LOS CUADRANTES SOLARES • EL CARBUNCO • GAS INTERESTELAR

INVESTIGACION y CIENCIA

MARZO 2002
5 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA ENERGIA NUCLEAR DE PROXIMA GENERACION

Microchips en vertical

La economía del juego limpio

La apertura del paso del Drake

Los orígenes de la informática personal





Marzo de 2002 Número 306

SECCIONES

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES



Portada: Nuclear Engineering International

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	NASA GSFC Astrophysics Data Facility (*radio infrarrojo [408 MHz], hidrógeno atómico, infrarrojo lejano, rayos X y rayos gamma*); Roy Duncan (*radio infrarrojo [2,4-2,7 GHz]*); T. Dame (*hidrógeno molecular*); S. D. Price (*infrarrojo*); A. Mellinger (*luz visible*)
6-7	C. Howk, B. Savage y N. Sharp (*NGC 891*); Don Dixon
9	J. English, Canadian Galactic Plane Survey y Russ Taylor
10	Don Dixon
12	R. J. Reynolds (*arriba*); NASA y D. Wang (*imagen de rayos X*), NASA/UIT (*imagen ultravioleta*) [*centro*]; K. R. Sembach y The Fuse Science Team (*abajo*)
15	David Scharf
17	Joe Zeff
18	David Scharf
19	Nina Finkel
20	Joe Zeff
21	Matrix Semiconductor
22-26	Brian Cronin
40-42	Museo del Instituto Pasteur
45	Instituto Pasteur
47	Sociedad Astronómica de Francia
48	RMN Hervé Lewandowski (*arriba, izquierda*); G. Dagli Orti (*arriba, derecha*); R. Verseau (*abajo, izquierda*); Lycée Stendhal (*abajo, derecha*)
49	Sociedad Astronómica de Francia (*izquierda*); P.L.S. (*derecha*)
50	Pour la Science
51	S. Grégori
52	Cortesía de Nuclear Engineering International
54-55	Don Foley
56-57	Arizona Public Service
58-60	Don Foley
61	Franck Prevel
62	Tom Draper Design; MIT Museum (*simulador de vuelo*)
64	MIT Museum (*Whirlwind, Sage, Licklider*); Compaq Computer Corp. (*Olsen y Anderson, PDP-1*)
66	Compaq Computer Corporation (*PDP-8, VAX*); Bootstrap Institute (*Engelbart*); Cortesía de Xerox Parc; Doug Wilson (*Gates y Allen*); Ap Photo/Apple Computers, Inc. (*Jobs*); Steve Castillo (*Wozniak*); Reproducido de *Popular Electronics*, enero de 1975, con permiso de Gernsback Publications, Inc. (*portada*); Cortesía de Vinton Cerf (*Cerf*)
68	Cortesía de Apple Computer, Inc. (*Apple II, Macintosh*); Cortesía de Xerox Parc (*Xerox Star*); IBM (*IBM PC*); Microsoft Corporation (*Windows 1.0*); Elise Amendola (*Berners-Lee*)
69	Eyewire
73-82	Andrés Maldonado
88-89	Bryan Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero: *El gas entre las estrellas*; Luis Bou: *Microchips en vertical, Los orígenes de la informática personal* y *Aventuras problemáticas*; Juan Pedro Campos: *La economía del juego limpio*; M.ª José Báguena: *El carbunco y su capacidad letal*; José Chabás: *Los cuadrantes solares*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	55,00 euro	100,00 euro
Extranjero	80,00 euro	150,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
Extraordinario: 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 914 097 045 – Fax 914 097 046

Cataluña y Baleares:
Sergio Munill
Valencia, 58 entlo. 2.ª
08015 Barcelona
Tel. y fax (34) 932 263 624

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

MÁQUINAS LÓGICAS. «La lógica simbólica, formulada en el siglo XIX por el matemático inglés George Boole, se ha convertido en una potente herramienta para tratar complicados problemas de matemáticas y economía. Por ahora las máquinas lógicas tienen un valor muy limitado, ya que la ciencia se enfrenta a pocos problemas de naturaleza estrictamente lógica tan complejos como para requerir ayuda mecánica. Puede que las redes lógicas lleguen a ser cada vez más útiles en el funcionamiento de las computadoras electrónicas gigantes. Surgen a menudo problemas cuando hay que decidir la mejor manera de preparar la máquina para una tarea dada, y muchas veces esos problemas son de índole puramente lógica. Las computadoras del futuro incorporarán quizá circuitos lógicos a fin de que tales decisiones se tomen automáticamente. —Martin Gardner»

...cien años

LAS TURBINAS SE IMPONEN. «Sin lugar a dudas, estamos realmente entrando en una era nueva en la evolución del motor de vapor, ahora que el vapor ha dejado de ser el origen de todo movimiento. Considerando las necesidades de servicio de las locomotoras, no es probable que la turbina desplace alguna vez a las máquinas alternativas en esa clase de trabajo. Pero como mecanismo motor para la generación eléctrica sus cualificaciones son de primera, y habida cuenta de que la energía eléctrica parece destinada a ampliar indefinidamente su campo de aplicación, el crecimiento de la turbina de vapor en conexión con la industria eléctrica está destinado a ser rápido y general.»

MAPA DEL CEREBRO SIMIESCO. «Puede que los pacientes con trastornos nerviosos, especialmente los que bloquean la acción muscular, tengan motivos para bendecir el recuerdo de unos grandes monos que han cooperado desinteresadamente, y sin haber sido consultados, con algunos científicos y médicos británicos en unos experimentos privados. El estudio de los cerebros de los monos superiores ha mostrado que su composición se parece lo suficiente a la del cerebro de los seres humanos como para justificar la creencia en que tales investigaciones podrían brindar conocimientos sobre éste.»

LOCURA AUTOMOVILISTA. «No se ha visto nada como el desarrollo de la industria del automóvil. Además, en muy poco tiempo, éste ha pasado de su tosca concepción inicial a su estado actual, tan desarrollado. Es posible que el año 1901-1902 figure como uno de los más importantes en la historia del automóvil en América del Norte. Es el momento propicio para un número especial de *Scientific American* dedicado al automóvil.»

Numero especial de 1902

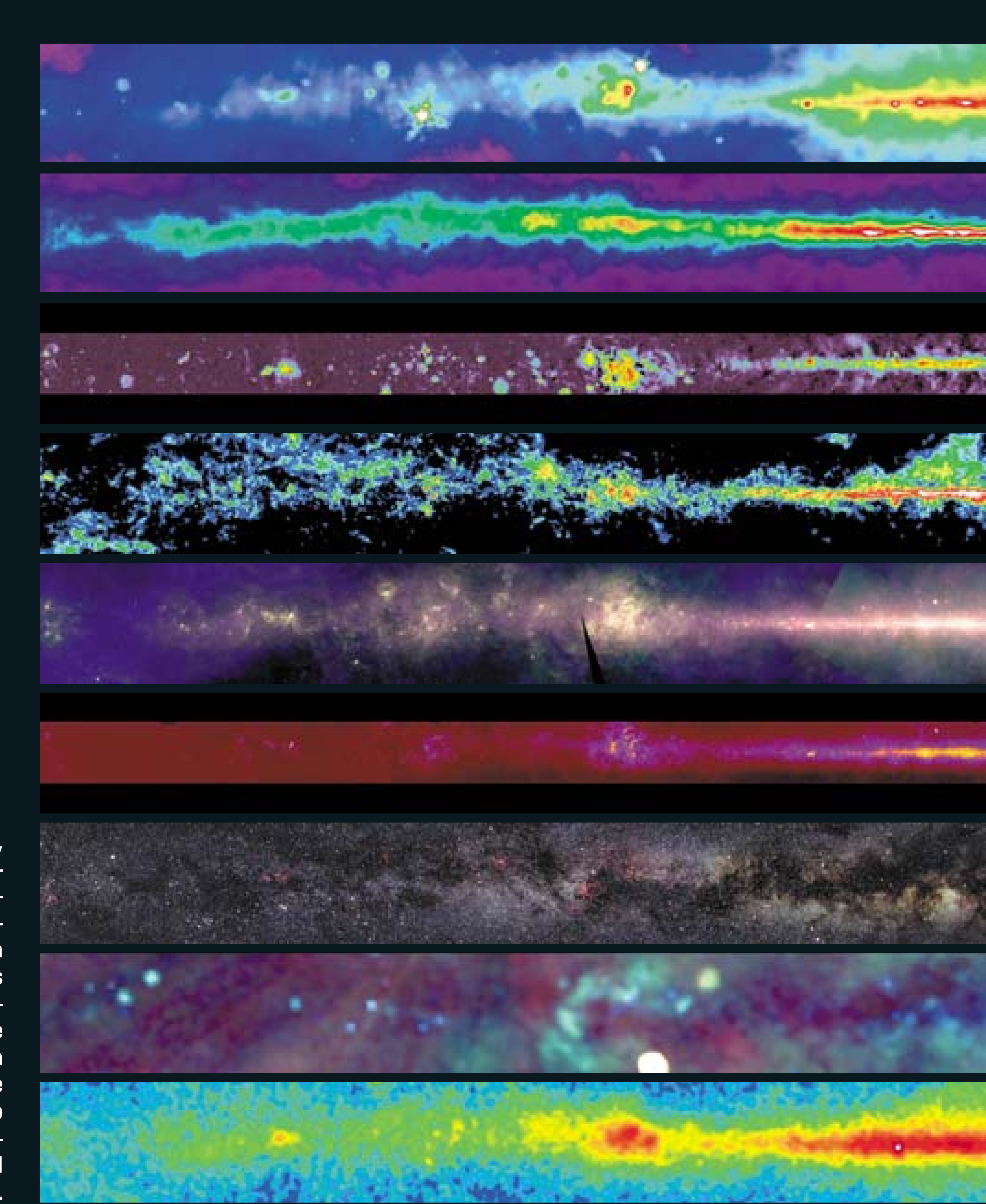
NO ES HOGWARTS. «Unos científicos van a someter a los hijos de unas familias ricas a ciertos experimentos alimentarios en un hogar infantil espléndidamente equipado, la Escuela Hospital de Chicago para niños nerviosos y delicados, afirma el *New York Medical Journal*. Sólo los acomodados pueden permitirse enviar sus hijos a esa escuela, que acoge a lo sumo a quince niños y recibe más solicitudes que las que está en condiciones de atender.»

...ciento cincuenta años

AVISO SOBRE LA VIRUELA. «Un trabajo del doctor T. H. Buckler, médico del asilo de Baltimore, habla de la propagación de la viruela mediante los billetes de banco. ‘El interno de un hospital variólico, si desea un limón, envía un billete saturado del veneno (y, posiblemente, con el mareante olor de la viruela) a un confitero, quien, ni que decir tiene, lo admite. Sería imposible concebir un mejor modo de propagar una enfermedad de la que se sabe cuán infecciosa y contagiosa es.’»

ESCEPTICISMO NEBULAR. «Pierre Simon Laplace creía que el sistema solar fue al principio una vasta nebulosa, en un elevado estado calórico a causa de las acciones químicas. Nos oponemos [la redacción] radicalmente a la hipótesis nebular. Que este mundo hubiera tenido originalmente un estado gaseoso querría decir, imagíneselo, que antes fue una masa de gases en caótica confusión, de más de trece millones de millas de diámetro, lanzada además por el espacio como un barco sin velas ni timones. Tales filósofos poseen unas extrañas ideas acerca del Gobierno Divino.»

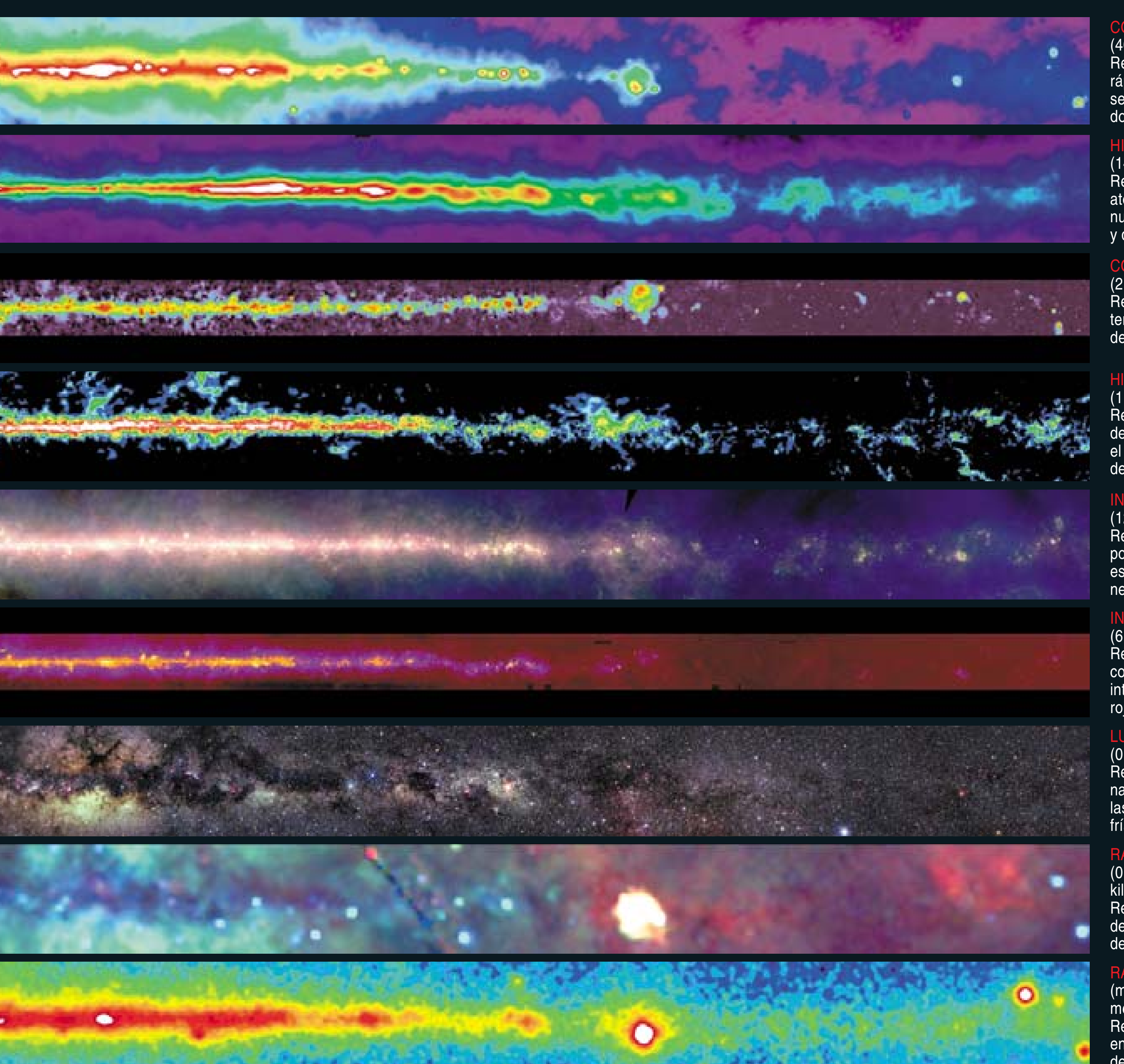
El gas entre las estrellas



1. LA VIA LACTEA, nuestra galaxia, tiene un aspecto muy diferente según la frecuencia en que se la observe. Hace 50 años, cuando los astrónomos tenían que limitarse a la luz visible, el gas que hay entre las estrellas era simplemente una molestia porque “tapaba” los objetos de interés, las estrellas. Hoy se piensa que el gas podría ser tan importante en la evolución de la galaxia como las propias estrellas. Estas tiras pertenecen a un cartel preparado por el centro espacial Goddard de la NASA.

El medio interestelar, lleno de surtidores colosales de gas caliente, de vastas burbujas procedentes de las explosiones de estrellas, es mucho más interesante de lo que se pensaba

Ronald J. Reynolds



CONTINUO DE RADIO
(408 MHz)
Revela los electrones en rápido movimiento, que se hallan sobre todo donde hubo supernovas.

HIDROGENO ATOMICO
(1420 MHz)
Revela el hidrógeno atómico neutro de las nubes interestelares y del gas difuso.

CONTINUO DE RADIO
(2,4-2,7 GHz)
Revela el gas ionizado templado y los electrones de alta energía.

HIDROGENO MOLECULAR
(115 GHz)
Revela (por medio del monóxido de carbono) el hidrógeno molecular de las nubes frías.

INFRARROJO LEJANO
(12-100 micras)
Revela el polvo calentado por la luz de las estrellas, especialmente en las regiones de formación estelar.

INFRARROJO MEDIO
(6,8-10,8 micras)
Revela las moléculas complejas de las nubes interestelares y las estrellas rojas.

LUZ VISIBLE
(0,4-0,6 micras)
Revela las estrellas cercanas y el gas ionizado tenue; las regiones oscuras son frías y densas.

RAYOS X
(0,25-1,5 kiloelectronvolt)
Revela el gas caliente de las ondas de choque de las supernovas.

RAYOS GAMMA
(más de 300 megaelectronvolt)
Revela fenómenos de alta energía, como las colisiones de púlsares y de rayos cósmicos.

La atmósfera dinámica de la galaxia



Las vistas de arriba y de la página anterior son un corte a través de la Vía Láctea.

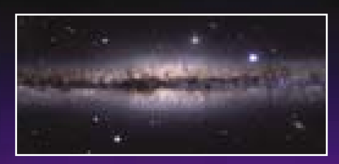
1 Se crea una superburbuja a partir de un cúmulo de estrellas de gran masa.

2 Una estrella explota en supernova y se forma una burbuja de gas caliente de baja densidad.

3 Puesto que las estrellas de gran masa tienen un tiempo de vida similar, pronto estallará otra.

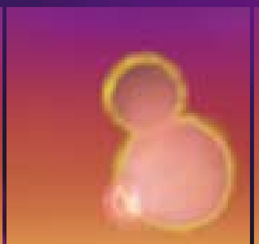
4 Las dos burbujas se unen. Los vientos estelares facilitan energía a las burbujas.

El término “medio interestelar” traía antes a la mente una imagen como la de la derecha: nubes gélidas y grumosas de gas y polvo, en reposo, cercanas al plano galáctico. Hoy se admite que el medio es una atmósfera proteica agitada por las explosiones de las supernovas. El gas asciende por las chimeneas para luego caer en poderosos surtidores.

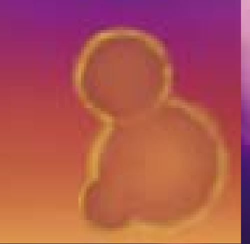


Galaxia NGC 891 en luz visible

s



5 Una tercera estrella explota. El medio interestelar empieza a parecer un queso suizo.



6 Las tres burbujas se unen y abren un paso para el gas caliente y la radiación.

Composición de la atmósfera galáctica

	EN NUBES		ENTRE NUBES		
Componente	H_2	H I	H I TEMPLADO	H II TEMPLADO	H II CALIENTE
Temperatura (K)	15	120	8000	8000	$\sim 10^6$
Densidad del plano medio (cm^{-3})	200	25	0,3	0,15	0,002
Espesor de la capa (parsecs)	150	200	1000	2000	6000
Fracción en volumen (%)	0,1	2	35	20	43
Fracción en masa (%)	18	30	30	20	2

Parte del medio interestelar adopta la forma de nubes sueltas de hidrógeno atómico (H_I) o de hidrógeno molecular (H_2); el resto, en su mayor parte, permanece en forma de gas ubicuo ionizado (H_{II}) o atómico. Se entremezclan trazas de otros elementos. La masa total es aproximadamente un quinto de la masa de las estrellas de la galaxia.

Creemos que la Luna es un lugar, pero en realidad es cientos de millones de lugares, un archipiélago de soledades. Se puede ir de los 100 grados bajo cero a los 100 grados sobre cero con un pequeño paso. Podríamos gritar al oído de un amigo, que no nos oiría. Sin una atmósfera que transmita el calor o el sonido, cada rincón de la Luna es una isla en un mar por donde no se puede navegar.

La atmósfera de un planeta hace que su superficie sea un todo unificado. Gracias a ella las condiciones físicas, la temperatura por ejemplo, varían con suavidad. El impacto de un asteroide, la erupción de un volcán, la emisión de gases por la chimenea de una industria suelen tener efectos más allá del pequeño lugar donde ocurren. Los fenómenos locales pueden tener consecuencias globales. Esta propiedad de las atmósferas se ha ganado ahora el interés de los astrónomos que estudian nuestra galaxia, la Vía Láctea.

Durante muchos años hemos sabido que una atmósfera muy delgada, el medio interestelar, envuelve nuestra galaxia y llena el espacio entre los miles de millones de estrellas. Hasta hace poco parecía que era una reserva estática de gas frío que esperaba en silencio a condensarse en estrellas. Cuesta distinguirlo cuando se mira al cielo en una noche estrellada. En cambio, hoy día sabemos que es una mezcla tempestuosa de una gran variedad de densidades, temperaturas y ionizaciones. Las explosiones de las supernovas producen burbujas gigantes, se arquean surtidores y chimeneas sobre el disco espiral y desde más allá de éste caen nubes. Estos y otros procesos entrelazan regiones remotas de nuestra galaxia tal y como los fenómenos atmosféricos comunican las perturbaciones de un confín de la Tierra a otro.

Los telescopios de superficie y del espacio muestran que la atmósfera de la galaxia es tan compleja como la de un planeta. El medio interestelar, sostenido por el empuje gravitatorio combinado de las estrellas y de otros materiales galácticos, atravesado por la luz estelar, por partículas de gran energía y por el campo magnético, se agita, calienta, recicla y transforma sin cesar. Como en una atmósfera, la densidad y temperatura mayores se dan en el "fondo", que en este caso es el plano que define la mitad de la galaxia, donde la presión debe contrapesar el peso del medio de "arriba". Las concentraciones densas de gas —las "nubes"— se crean cerca de ese plano medio. De las subcondensaciones más densas nacen las estrellas.

El autor

RONALD J. REYNOLDS es catedrático de astronomía de la Universidad de Wisconsin en Madison. Ha diseñado y construido espectrómetros de alta sensibilidad para estudiar el gas ionizado caliente de la Vía Láctea. Es el investigador principal del Cartógrafo en H-alfa de Wisconsin (WHAM), el instrumento que en dos años ha hecho el mapa del hidrógeno de todo el cielo boreal.

Cuando las estrellas consumen su combustible nuclear y mueren, las que tienen al menos tanta masa como el Sol devuelven gran parte de su materia al medio interestelar. A medida que la galaxia envejece, pues, cada generación de estrellas va contaminando el medio con elementos pesados. Como pasa en el ciclo terrestre del agua, a la "evaporación" le sigue la precipitación, y el material se recicla una y otra vez.

Allá arriba en el aire

Pensar en el medio interestelar como en una verdadera atmósfera ayuda a unificar algunos de los problemas más candentes de la astrofísica. El primero y más importante es la formación de las estrellas. Aunque se conocen los principios básicos desde hace décadas, se ignora con exactitud qué determina cuándo las estrellas nacen del medio interestelar y a qué ritmo lo hacen. Los teóricos explicaban antes la creación de las estrellas teniendo en cuenta sólo las condiciones locales de una nube de gas aislada. Ahora también consideran las condiciones de la galaxia entera.

No sólo influyen esas condiciones en la formación de las estrellas, sino que la formación de las estrellas influye a su vez en las condiciones galácticas. Lo que una generación de estrellas hace determina el medio donde las futuras generaciones nacerán, vivirán y morirán. El comprender este efecto de retroalimentación —el efecto de las estrellas, especialmente de las más calientes, raras y de mayor masa, en las propiedades a gran escala del medio interestelar— es otro de los grandes desafíos para los investigadores. La retroalimentación puede ser tanto positiva como negativa. Por una parte, las estrellas de gran masa calientan y ionizan el medio y hacen que se hinche y salga del plano medio de la galaxia. Esa expansión aumenta la presión ambiente; comprime las nubes y puede llegar a hacer que se derrumben sobre sí mismas y se cree una nueva generación de estrellas. Por otra parte, el calentamiento y la ionización agitan también las nubes y es posible que de esa forma inhiban el nacimiento de nuevas estrellas. Cuando las estrellas mayores explotan destrozan incluso las nubes de las que se formaron; una retroalimentación negativa podría explicar por qué el colapso gravitatorio de las nubes que engendra las estrellas es un proceso tan ineficaz. Lo normal es que sólo un tanto por ciento pequeño de la masa total de la nube se transforme en estrellas.

Un tercer enigma que debe dilucidarse es la frecuencia de los brotes, esporádicos pero intensos, de formación de estrellas. En la Vía Láctea los dos efectos de retroalimentación casi se contrarrestan, y las estrellas nacen a un ritmo que no se acelera —unas 10 estrellas por año en promedio—. Sin embargo, en algunas galaxias, como la "galaxia en explosión" M82, la retroalimentación positiva se ha impuesto. Desde hace 20 o 50 millones de años la formación estelar en las regiones centrales de M82 está fuera de control y procede diez veces más deprisa que antes. Puede que también nuestra galaxia haya tenido bro-

tes esporádicos. Cómo surgen estos brotes estelares y qué los apaga son preguntas que deben ligarse a la compleja relación que hay entre las estrellas y la tenue atmósfera donde nacen.

Finalmente, se debate acerca de la rapidez con la que la actividad atmosférica va agotándose. La mayoría de las estrellas —las de menor masa que el Sol, que viven decenas e incluso centenares de miles de millones de años— no contribuyen a los ciclos de retroalimentación. Cada vez va quedando encerrada una parte mayor del gas interestelar en esas estrellas de larga vida. Con el tiempo, todo el gas disponible de la Vía Láctea se habrá consumido y atrás sólo quedarán despojos estelares. Con qué rapidez ocurrirá esto dependerá de si la Vía Láctea es una caja cerrada o no. Las observaciones más recientes indican que es todavía un sistema abierto que gana y pierde masa con su entorno cósmico. Parece que le llueven del espacio intergaláctico nubes de alta velocidad de un hidrógeno relativamente impoluto que la rejuvenece. Mientras tanto, podría estar expulsando gas en forma de un viento de alta velocidad que sopla desde la atmósfera exterior; recuerda a cómo expele el Sol lentamente masa por medio del viento solar.

Hidrógeno caliente y frío sobre la marcha

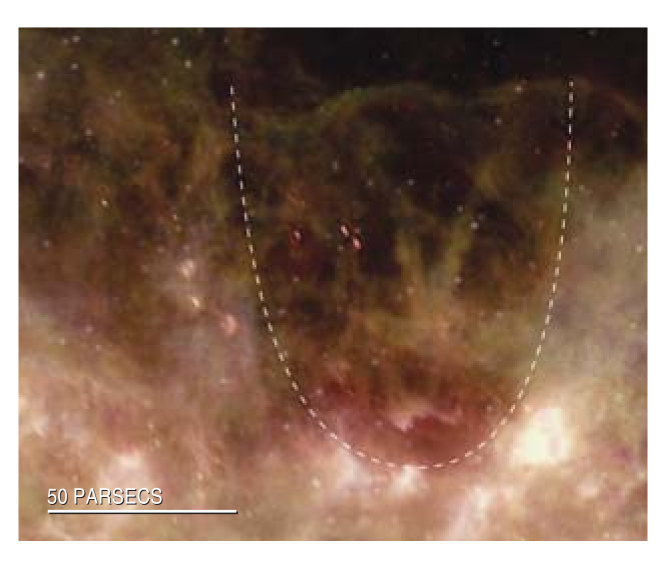
Para abordar estos problemas, quienes estudiamos el medio interestelar hemos tenido que identificar primero los diversos componentes de que consta. Se dio el paso inicial, el análisis de su composición elemental, en los decenios de 1950 y 1960; se utilizó para ello el espectro de la luz emitida por nebulosas brillantes, como la de Orión. Conforme al número de núcleos de átomos, el medio es en un 90 % hidrógeno y casi en un 10 % helio, y de lo demás —desde el litio hasta el uranio— sólo hay una traza de un 0,1 por ciento.

Puesto que el hidrógeno es tan abundante, la estructura de la atmósfera de la galaxia depende principalmente de las formas que adopte. Las primeras observaciones eran sensibles sobre todo a los componentes neutros y fríos. El trazador por excelencia del material interestelar es la línea espectral más famosa de la astronomía, la línea H_I a 1420 megahertz (21 centímetros) que emiten los átomos de hidrógeno neutro. Desde los años cincuenta se ha estado rastreando la distribución de H_I dentro de nuestra galaxia. Reside en grumos y filamentos, con densidades de 10 a 100 átomos por centímetro cúbico y temperaturas cercanas a los 100 kelvin, que a su vez están sumergidos en una capa más difusa, rala (alrededor de 0,1 átomos por centímetro cúbico) y tibia (unos pocos miles de kelvin). La mayor parte del H_I se encuentra próxima al plano galáctico medio y forma un disco gaseoso de unos 300 parsecs de espesor (1000 años luz), la mitad más o menos del grosor del disco estelar principal, ése que observamos en una noche oscura como Vía Láctea.

El hidrógeno también se presenta en forma molecular (H_2). Es dificilísimo detectarla directamente. La mayor parte de la información relativa a esta molécula se ha inferido de las observaciones en radio de alta frecuencia de las moléculas de monóxido de carbono. Donde exista monóxido de carbono, existirá hidrógeno molecular. Parecía que estas moléculas estaban confinadas en las nubes más frías y densas, en los lugares donde la luz de las estrellas, que rompe las moléculas en sus átomos constituyentes, no puede penetrar. Esas nubes densas son sitios activos de formación estelar, y se encuentran en una capa fina (100 parsecs de espesor) situada en el mismísimo fondo de la atmósfera galáctica.

Hasta hace muy poco tiempo se habían visto directamente las moléculas de hidrógeno sólo en los lugares donde la radiación ultravioleta o el viento de partículas de una estrella cercana las destruyen —las convierte en átomos sueltos de hidrógeno—. En estos entornos el H_2 brilla en una longitud de onda infrarroja de 2,2 micras. En los últimos años, sin embargo, los espectrógrafos orbitales —el ORFEUS-SPAS, puesto en órbita por el transbordador espacial, o un satélite nuevo, el Explorador Espectroscópico Ultravioleta (FUSE)— han observado hidrógeno molecular a longitudes de onda ultravioletas próximas a las 0,1 micras. Estos instrumentos buscan el hidrógeno iluminado por estrellas lejanas y cuásares: el H_2 deja líneas de absorción distintivas en los espectros ultravioletas de esos objetos. La ventaja de este método es que puede detectar hidrógeno molecular en regiones estables de la galaxia, lejos de cualquier estrella.

Para asombro general, dos equipos, dirigidos respectivamente por Philipp Richter, de la Universidad



2. LA SUPERBURBUJA CONIFORME Chimenea W4 (*línea de puntos*) se creó probablemente a partir de un cúmulo de estrellas que tenían una gran masa. En el centro se encuentra un filamento de gas con forma de V, como si lo hubiera barrido la fuerza de las explosiones supernova y de las emanaciones estelares. Esta imagen es una composición en falso color de mapas de radio e infrarrojo del gas frío de hidrógeno.

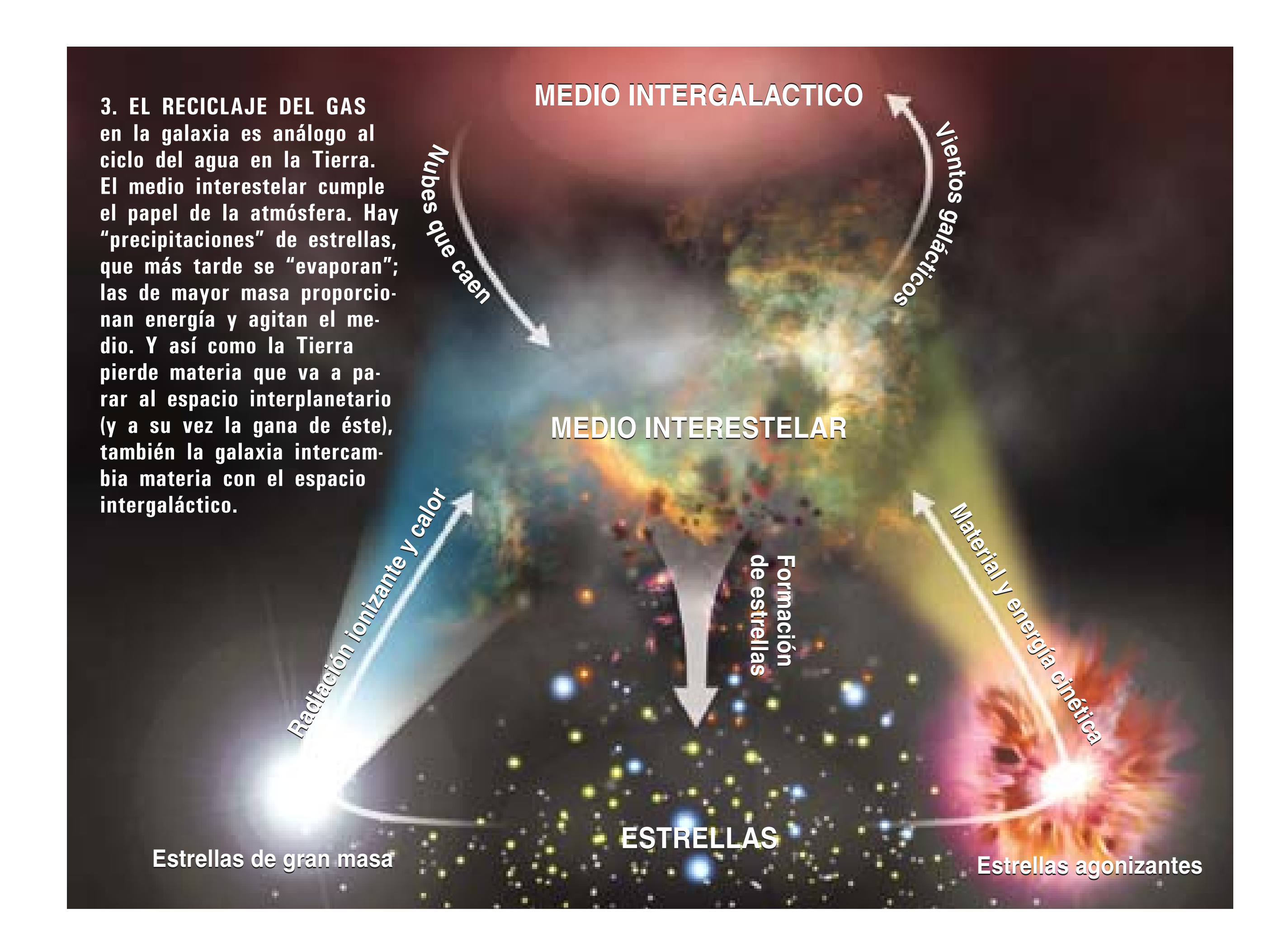
de Wiscosin, y Wolfgang Gringel, de la Universidad de Tubinga, han descubierto H_2 no sólo en los lugares habituales —las nubes de alta densidad localizadas dentro del disco galáctico—, sino también en regiones de baja densidad de fuera del disco. Esto es un misterio, puesto que las densidades altas son necesarias para proteger las moléculas de la agresión de la luz estelar. Es posible que haya una población de nubes frías mucho más alejada del plano medio galáctico de lo que antes se creía.

Una tercera forma del hidrógeno es el plasma de iones de hidrógeno. Se suponía que el hidrógeno ionizado estaba encerrado en unos cuantos lugares aislados y pequeños: en las nebulosas brillantes próximas a estrellas luminosas y en los restos que dejan las explosiones de las supernovas. El avance técnico de los detectores y el advenimiento de la astronomía espacial han cambiado las cosas, y se han detectado dos nuevos componentes de la atmósfera de nuestra galaxia: el hidrógeno ionizado (H_{II}) caliente (un millón de kelvin) y el templado (10.000 kelvin).

Al igual que las moléculas de hidrógeno halladas recientemente, estas fases de H_{II} se extienden hasta muy por encima de la capa de H_I frío y crean un grueso "halo" gaseoso alrededor de la galaxia entera. El calificativo de "interestelar" no parece ya apropiado para describir esas regiones, las más externas de la atmósfera de nuestra galaxia. La fase más caliente podría extenderse miles de parsecs desde el plano medio y enrarecerse hasta densidades cercanas a los 0,001 iones por parsec cúbico. Es en realidad la corona de la galaxia, análoga a la atmósfera caliente y extensa de nuestro Sol. Como pasa con la corona solar, de la mera existencia de la corona galáctica se sigue que ha de existir una fuente poco ordinaria de energía a la que le deba su alta temperatura. Parece que el quid está en las ondas de choque de las supernovas y en los rápidos vientos estelares. El plasma templado, energizado por la radiación ultravioleta extrema, coexiste junto con el plasma caliente. El peso de estas capas extensas aumenta la presión del gas en el plano medio, y eso tiene un efecto considerable en la formación de estrellas. Parece que otras galaxias también tienen corona. El observatorio de rayos X Chandra ha descubierto hace poco una alrededor de la galaxia NGC 4631 (*véase la figura 5*).

Generación de burbujas

Tras identificar en el medio estas nuevas fases de mayor energía, los astrónomos han vuelto a preguntarse cómo se comportan y se interrelacionan los distintos componentes. No sólo el medio interestelar



3. EL RECICLAJE DEL GAS en la galaxia es análogo al ciclo del agua en la Tierra. El medio interestelar cumple el papel de la atmósfera. Hay "precipitaciones" de estrellas, que más tarde se "evaporan"; las de mayor masa proporcionan energía y agitan el medio. Y así como la Tierra pierde materia que va a parar al espacio interplanetario (y a su vez la gana de éste), también la galaxia intercambia materia con el espacio intergaláctico.

va recorriendo un ciclo por mediación de las estrellas, sino que va pasando de la forma H_2 a la H_I y a la H_{II}, y de frío a caliente, y vuelta a empezar. Las estrellas de gran masa son las únicas fuentes de energía conocidas tan poderosas como para que expliquen esta actividad. Un estudio realizado por Ralf-Jürgen Dettmar, de la Universidad alemana de Bochum, ha mostrado que las galaxias con una población superior a la normal de estrellas de gran masa tienen atmósferas más extendidas o infladas. No está del todo claro el mecanismo en cuya virtud las estrellas inyectan energía por toda una galaxia, aunque a menudo se piensa que se debe a la creación de gas ionizado caliente.

Parece que producen ese gas las ondas de choque de alta velocidad (100 a 200 kilómetros por segundo) que tras una explosión de supernova se expanden por el interior del medio interestelar. Dependiendo de la densidad del gas y de la intensidad del campo magnético presentes en el medio, la expansión esférica de la onda de choque abrirá una cavidad con un radio de entre 50 y 100 parsecs, una burbuja gigantesca.

El choque acelera una fracción pequeña de los iones y electrones hasta velocidades próximas a la de la luz. Estas partículas veloces —los rayos cósmicos— son una de las formas en que la muerte estelar alimenta (positiva y negativamente) el nacimiento de estrellas. Los rayos cósmicos incrementan la presión del medio interestelar; las mayores presiones, a su vez, comprimen las nubes moleculares densas y aumentan la probabilidad de que se derrumben sobre sí mismas y formen estrellas. Al ionizar parte del hidrógeno, los rayos cósmicos instan también reacciones químicas que sintetizan moléculas complejas, algunas de las cuales son los ladrillos de la vida tal y como la conocemos. Y como los iones se adhieren a las líneas del campo magnético, atrapan el campo dentro de las nubes; eso frena el ritmo al que el hundimiento de éstas crea estrellas.

Si las burbujas calientes se creasen con una frecuencia suficiente podría ocurrir que se interconectaran en una inmensa espuma. Esta idea fue propuesta en los años setenta por Barham Smith y Donald Cox, de la Universidad de Wisconsin en Madison. Un par de años más tarde, Christopher F. McKee, de la Universidad de California en Berkeley, y Jeremiah P. Ostriker, de la Universidad de Princeton, argumentaron que la fase caliente debería ocupar entre el 55 % y el 75 % del espacio interestelar. Las fases neutras y más frías estarían confinadas en nubes aisladas dentro de esa red ionizada; es, en esencia, el orden de cosas inverso al tradicional, en el que el gas neutro domina y el ionizado queda encerrado en bolsas pequeñas.

Las últimas observaciones parecen apoyar esta subversión de las ideas ordinarias. La cercana galaxia espiral M101, por ejemplo, tiene un disco circular de hidrógeno atómico gaseoso plagado de huecos, presumiblemente originados por estrellas de mucha masa. También parece un queso suizo el medio interestelar de una galaxia que está a siete mil millones de años-luz. No obstante, la cantidad de gas caliente y su influencia en la estructura de las atmósferas galácticas es motivo todavía de mucho debate.

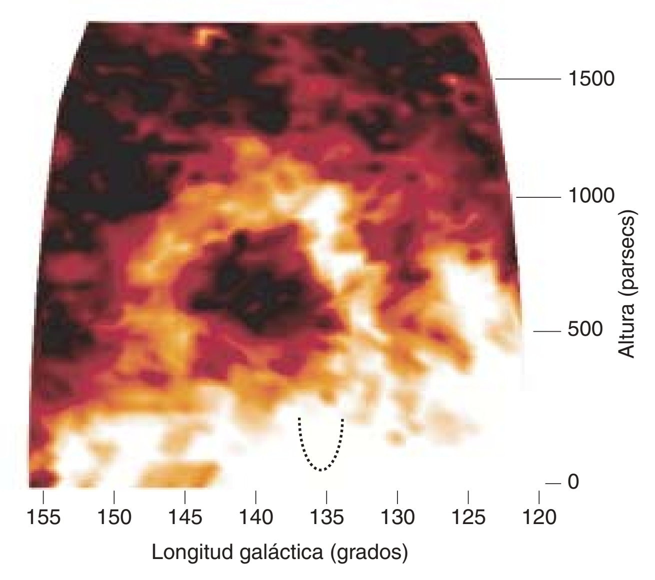
Chimeneas y surtidores

El Sol mismo parece estar dentro de una burbuja caliente, que se deja ver con los rayos X que emiten los átomos muy ionizados, de oxígeno por ejemplo, que posee en cantidades de traza. Parece que esta región de gas caliente, la llamada “burbuja local”, fue creada por una supernova cercana hará un millón de años.

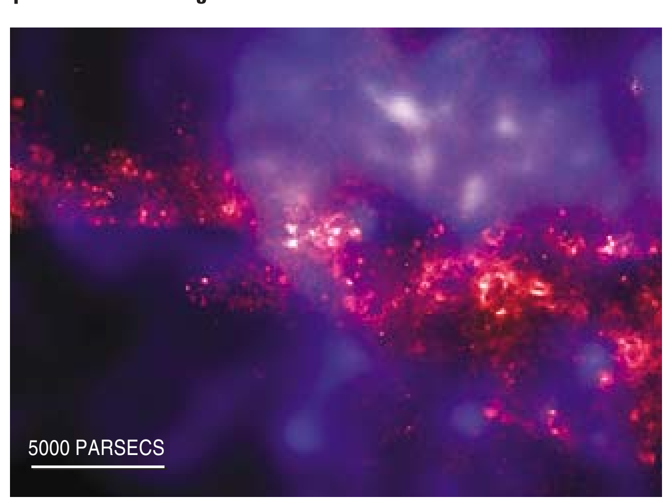
Un ejemplo aún más espectacular se encuentra a 450 parsecs del Sol, en la dirección de las constelaciones de Orión y Eridanus. La estudiaron hace poco Carl Heiles, de la Universidad de California en Berkeley, y sus colaboradores. Originó la burbuja de Orión-Eridanus un cúmulo estelar de la constelación de Orión que pertenece a una elite: es una “asociación OB”, es decir, un conjunto de estrellas de los tipos más calientes y de mayor masa que hay, los O y B (son de 20 a 60 veces más pesadas que el Sol, incluido en el tipo G, y de mil a cien mil veces más brillantes). A lo largo de los últimos diez millones de años, las impresionantes muertes de estas estrellas de corta vida, sus estallidos en forma de supernovas, han arrastrado el gas del ambiente a una capa fina, una cáscara, en el borde de la burbuja. En la luz visible la cáscara aparece como un entramado poco luminoso de filamentos y rizos ionizados. El gas a un millón de grados que rellena el interior desprende un resplandor difuso en rayos X.

En toda esa región hay una creación de estrellas tempestuosa que no muestra ningún signo de debilitamiento. La nube molecular gigante de la que surgió la asociación OB sigue precipitando estrellas. Una de las estrellas O más nuevas, theta^1 C Orionis, está ionizando una pequeña parte de la nube —es decir, está produciendo la nebulosa de Orión—. Sin embargo, con el tiempo las supernovas y la radiación ionizante romperán por completo la nube molecular y disociarán sus moléculas. El hidrógeno molecular se convertirá de nuevo en hidrógeno atómico y ionizado; la formación de nuevas estrellas cesará. Puesto que este violento proceso de conversión aumentará la presión del medio interestelar, el fin de esta nube molecular quizá dé lugar al nacimiento de estrellas en alguna otra región de la galaxia.

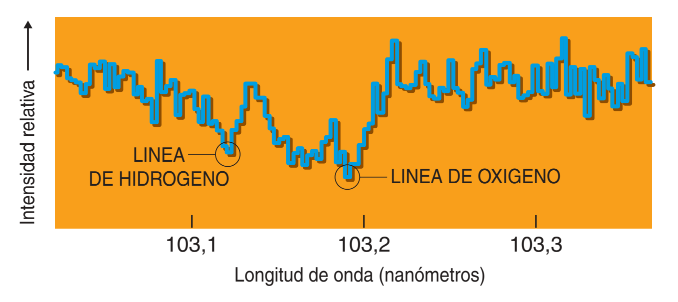
Las burbujas galácticas deberían levantarse del plano medio de la galaxia con facilidad, del mismo modo que las burbujas térmicas se levantan sobre el suelo caliente en la Tierra. Las simulaciones numéricas, como las recientemente realizadas por Mordecai-Mark MacLow, del Museo Americano de Historia Natural de la Ciudad de Nueva York, y sus colaboradores, indican que las burbujas pueden atravesar en su ascenso el halo entero de la galaxia. El resultado es una chimenea cósmica; a través de la misma, el gas caliente expulsado cerca del plano medio por una supernova accede a la atmósfera superior de la galaxia. Allí el gas se enfría y cae de nuevo sobre el disco galáctico: de esta forma la su-



4. UN ENORME RIZO DE HIDROGENO ionizado templado dibuja un arco sobre el disco de nuestra galaxia. Se encuentra justo por encima de la Chimenea W4 (*línea de puntos*) que se ve en la figura 2. Un mismo cúmulo estelar podría ser el origen de ambas estructuras.



5. ENVUELVE EL DISCO de la galaxia NGC 4631 un plasma caliente (*azul y púrpura*), como ha detectado el Observatorio de Rayos X Chandra. El telescopio de imágenes ultravioletas muestra la presencia de estrellas de gran masa dentro del disco (*naranja*).



6. EL PLASMA CALIENTE rodea también a nuestra galaxia. El Explorador Espectroscópico del Ultravioleta Lejano detectó esta línea espectral de oxígeno muy ionizado en una nube gaseosa iluminada por un cuásar. La nube está al menos a cinco kiloparsecs del disco.

perburbuja y la chimenea se convierten en un surtidor a escala galáctica.

Estos surtidores son posiblemente el origen de la corona caliente de la galaxia, e incluso de su campo magnético. Según los cálculos de Katia M. Ferrière, del Observatorio de Midi-Pyrénées, la combinación del movimiento ascendente con la rotación del disco de la galaxia actúa como una dinamo; se asemeja a los movimientos interiores del Sol y de la Tierra que generan sus campos magnéticos.

Los observadores, claro está, aún han de confirmar la ubicuidad de la fase caliente o la existencia de los surtidores. La burbuja de Orión-Eridanus llega a 400 parsecs del plano medio y una superburbuja similar de Casiopea a 230, pero aún les quedan a ambas por recorrer entre 1000 y 2000 parsecs antes de alcanzar la corona galáctica. Los campos magnéticos y un gas más denso y frío podrían dificultar o hacer imposible que las superburbujas llegasen al halo. Pero entonces, ¿de dónde habría salido la corona caliente? No se conoce otra explicación verosímil.

Entibiarse

El plasma templado (10.000 kelvin) es tan misterioso como el caliente. Según la concepción tradicional del medio interestelar, no cabe duda de que la presencia en todo lugar de gas ionizado templado es simplemente imposible. Ese gas debería concentrarse en regiones muy pequeñas del espacio, en las nebulosas de emisión, así la de Orión, que rodean estrechamente a las estrellas de masa ultragrande; de éstas sólo hay una por cada cinco millones, y la mayor parte del gas interestelar (el hidrógeno atómico y molecular) es opaco para sus fotones; el grueso de la galaxia, pues, no se vería afectado.

Sin embargo, el gas ionizado templado se extiende por el espacio interestelar. El instrumento WHAM, en un rastreo reciente, lo ha encontrado incluso en el halo galáctico, muy lejos de las estrellas O más cercanas. El gas ionizado presenta pareja difusión en otras galaxias. Esto es un completo misterio. ¿Cómo han podido arreglárselas los fotones ionizantes para perderse tan lejos de sus estrellas?

En las burbujas podría hallarse la respuesta. Si las supernovas han vaciado partes considerables del medio interestelar, a los fotones ionizantes les será posible viajar distancias largas antes de que los absorba el hidrógeno neutro. La asociación OB de Orión es un ejemplo excelente de cómo discurre el proceso. Las estrellas O se encuentran en una cavidad inmensa creada por supernovas más antiguas. Sus fotones viajan ahora libres por la cavidad, golpeando las lejanas paredes de la burbuja y haciendo que ésta brille. Si los surtidores galácticos o las chimeneas penetraran en el halo de la galaxia, no sólo se explicaría la corona caliente, sino también la constante presencia de gas ionizado templado.

Una imagen reciente de la superburbuja de Casiopea obtenida por WHAM parece dar algunas pistas: un rizo de gas templado se curva por encima de la burbuja a unos 1200 parsecs del plano medio. El per-

fil de este rizo se asemeja vagamente al de una chimenea, sólo que aún no ha penetrado en el halo exterior de la Vía Láctea. La cantidad de energía necesaria para producir esta estructura gigantesca es enorme —mayor que la energía disponible en las estrellas del cúmulo que formaron la burbuja—. Es más, el tiempo requerido para generar el rizo decuplica la edad del cúmulo, así que ha de ser el producto de muchas generaciones, de una serie de brotes sucesivos de formación estelar que antecedieron al cúmulo que vemos hoy día. Cada brote aportó nueva energía y expandió la burbuja creada por el anterior.

Una y otra vez

El hecho de que regiones grandes de la galaxia se vean influidas por el nacimiento de estrellas de gran masa en unas cuantas zonas localizadas parece requerir que la formación estelar esté coordinada durante largos períodos de tiempo. Bien puede ser que todo comenzase con una única estrella del tipo O o con un grupo de ellas dentro de una nube molecular gigante. La radiación estelar, los vientos y las explosiones excavarían una cavidad modesta en el medio interestelar circundante. Durante el proceso es posible que la nube madre se destruyese. Quizás esa perturbación desencadenara una formación de estrellas en otra nube próxima, y así sucesivamente, hasta que el medio interestelar en esa esquina de la galaxia pareciese un queso suizo. Las burbujas empezarían entonces a solaparse y a unirse en una superburbuja. La energía procedente de más y más estrellas O cebaría la expansión de la superburbuja hasta que su flotación natural la extendiese por encima del plano medio hacia el halo y se formase una chimenea.

La superburbuja es ahora una vía de escape del gas caliente del interior hacia los confines superiores de la atmósfera galáctica; así se genera la extensa corona. Lejos de su fuente de energía, el gas de la corona se enfría lentamente y va condensándose en nubes, que caen de nuevo al plano medio de la galaxia; de esta manera, con este surtidor, se completa el ciclo y el disco galáctico se repone con nubes frías donde habrá nuevas formaciones de estrellas.

Parece que los componentes y procesos principales de la atmósfera de nuestra galaxia están identificados, pero los detalles son aún inciertos. Se avanzará a medida que continúe el estudio del ciclo recorrido por el medio: intervención de las estrellas, diferentes fases del medio y relación entre el disco y el halo. Las observaciones de otras galaxias facilitan una vista de pájaro de lo que ocurre en el medio interestelar.

Es muy posible que no se estén teniendo en cuenta algunos aspectos cruciales. Por ejemplo, ¿son las estrellas la principal fuente energética del medio interestelar? El rizo que se alza sobre la superburbuja de Casiopea se parece demasiado a las prominencias que dibujan un arco sobre la superficie solar. Tales prominencias vienen inducidas por el campo magnético de la atmósfera solar. ¿Es posible que la actividad magnética domine también la atmósfera de nuestra galaxia? De ser así, la analogía entre las atmósferas galácticas y las estelares y planetarias podría ser aún más oportuna de lo que pensamos.

Bibliografía complementaria

FAR ULTRAVIOLET SPECTROSCOPIC EXPLORER OBSERVATIONS OF O VI ABSORPTION IN THE GALACTIC HALO. Blair D. Savage et al. en *Astrophysical Journal Letters*, volumen 538, número 1, páginas L27-L30; 20 de julio de 2000.

GAS IN GALAXIES. Joss Bland-Hawthorn y Ronald J. Reynolds en *Encyclopaedia of Astronomy & Astrophysics*. MacMillan e Institute of Physics Publishing, 2000.

DETECTION OF A LARGE ARC OF IONIZED HYDROGEN FAR ABOVE THE CAS OB6 ASSOCIATION: A SUPERBUBBLE BLOWOUT INTO THE GALACTIC HALO? Ronald J. Reynolds, N. C. Sterling y L. Matthew Haffner en *Astrophysical Journal Letters*, volumen 558, n.º 2, págs. L101-L104; 10 de septiembre de 2001.

THE INTERSTELLAR ENVIRONMENT OF OUR GALAXY. K. M. Ferrière en *Reviews of Modern Physics*, vol. 73, núm. 4 (en prensa).

Microchips en vertical

Los ingenieros han hallado la forma de comprimir mayor potencia de cómputo en los microcircuitos: construirlos no sólo a lo ancho, sino también a lo alto

Thomas H. Lee

La ciudad de San Francisco se extiende sobre unos 120 kilómetros cuadrados, el doble, aproximadamente, de la superficie de la isla de Manhattan. Pero la producción económica de Manhattan deja chiquita a la de San Francisco. Una de las principales razones de tal disparidad es que las oficinas de California, un territorio sísmicamente activo, propenden a dispersar a su personal y sus instalaciones casi a ras de suelo, mientras que en Nueva York las sedes de las empresas se apilan verticalmente, hacia el cielo. Al edificar a lo alto en lugar de a lo ancho los promotores no sólo incrementan el valor de sus terrenos, sino también la capacidad de trabajo de la ciudad en su conjunto.

Una estrategia similar, aplicada al mundo microscópico de los microcircuitos electrónicos, podría rejuvenecer a una industria de semiconductores que está mostrando síntomas de senectud desde hace algún tiempo. Resulta sorprendente que de los más de cien mil billones de transistores que, según Gordon E. Moore (uno de los fundadores de Intel), han sido fabricados hasta la fecha, prácticamente todos se hayan construido "a ras del suelo", es decir, directamente sobre las superficies de cristales de silicio. La población de transistores por microcircuito se ha ido duplicando con una regularidad asombrosa ("ley de Moore" le llaman a eso en el ramo) mediante la ampliación de la superficie de los chips y la reducción creciente del tamaño de cada transistor. Pero, por así decirlo, se construyen solamente galerías comerciales, no rascacielos.

La situación no tardará en cambiar. Para empezar, los físicos nos dicen que la ley de Moore llegará a su fin cuando las puertas que controlan el flujo de información dentro del microcircuito lleguen a ser de sólo la longitud de onda de un electrón (en el silicio, del orden de 10 nanómetros); los transistores dejarán entonces de funcionar como tales. Por otra parte, en el camino que media entre los dispositivos actuales punteros y dicho límite fundamental se atisban muchos y amedrentadores obstáculos de naturaleza técnica. La trayectoria del progreso ha empezado ya a declinar.

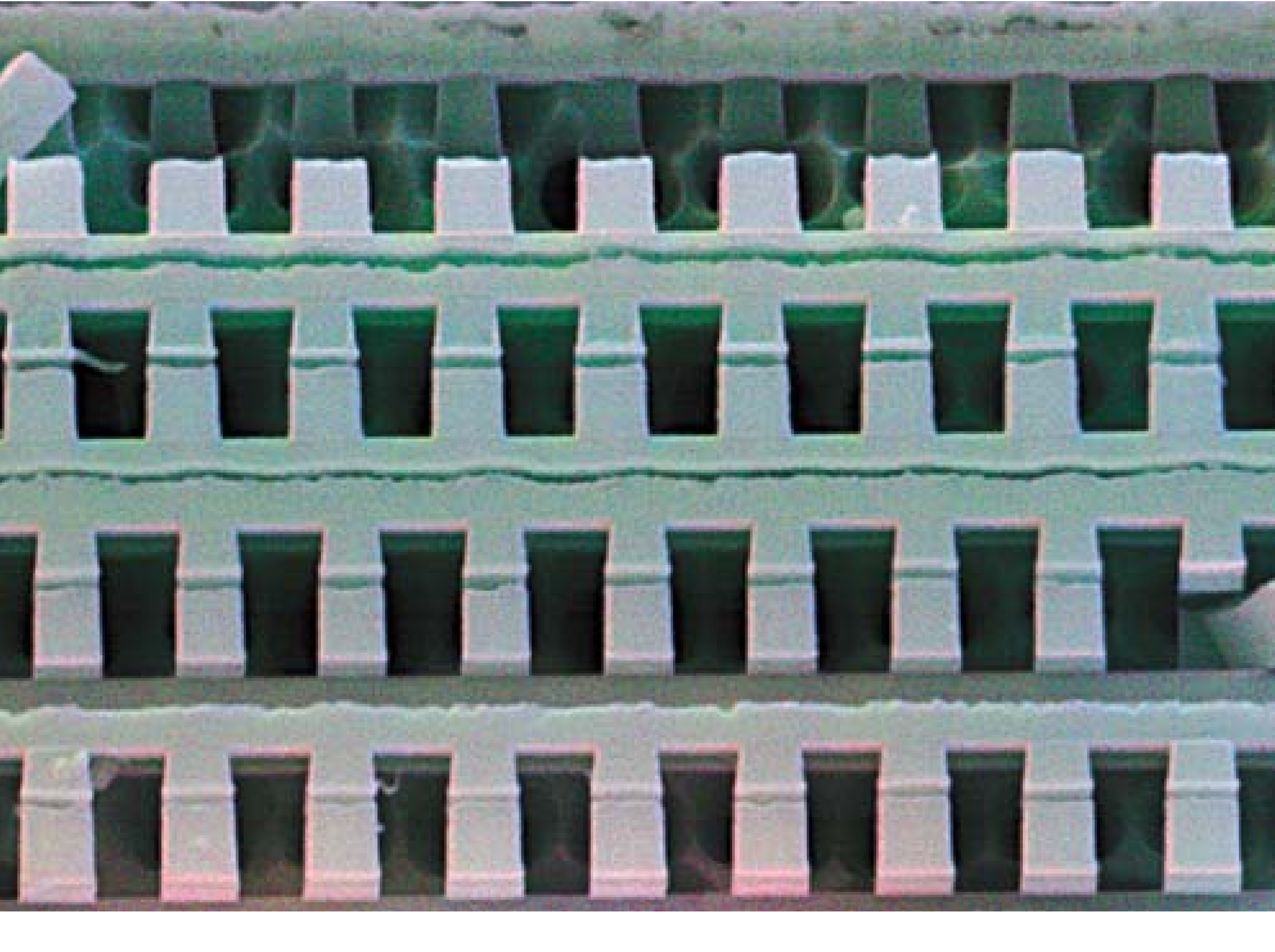
Por suerte, unos ingenieros hemos hallado recientemente una vía para esquivar algunos de tales obstáculos, dar a la ley de Moore alientos renovados e incluso acelerar la generación de mayor capacidad de cómputo a menor costo. Hemos demostrado que se pueden hacer microcircuitos verticales con las mismas fábricas de semiconductores de hoy, los mismos materiales para los chips y procedimientos de elaboración parecidos.

Unos microcircuitos "tridimensionales" —podría llamárselos "estereocircuitos" o "estereochips"— van a ser ahora puestos a la venta por Matrix Semiconductor, empresa fundada en 1998 por el autor con P. Michael Farmwald, científico informático, y Mark C. Johnson, experto en el diseño de microcircuitos. En la primera mitad de 2002 llegarán al mercado unos circuitos de memoria tridimensionales, los primeros ejemplares de una nueva generación de chips densos y económicos de la que se espera que haga que los medios de grabación digital resulten lo bastante económicos y prácticos como para reemplazar a la película fotográfica y las cintas de sonido. Hemos creado también, en los laboratorios de la Universidad de Stanford y de Matrix, prototipos de aparatos que incorporan circuitos lógicos verticales. Parece haber buenas razones para pensar que, incluso tratándose de microprocesadores, el techo es el cielo.

Las lindes de Planilandia

En nuestros días, los microcircuitos más avanzados no son estrictamente bidimensionales. Así, por ejemplo, el procesador Pentium 4 de Intel consta de siete capas de conexionado, incrustadas en configuraciones de material aislante. Empero, las regiones semiconductoras activas yacen sólo en el estrato base de silicio puro.

La industria ha ido hasta ahora arreglándoselas para cumplir la ley de Moore; en gran medida lo ha logrado perfeccionando el manejo de la oblea de sili-



cio. Las ciencias de materiales han inventado métodos para crear cristales de silicio gigantescos, de 30 centímetros de diámetro, que contienen menos de una parte de impurezas en mil millones. Los robots disparan en las "salas limpias" dosis cuidadosamente calibradas de ciertos iones sobre las obleas rebanadas de ese cristal. Las regiones que se convertirán en transistores gracias a esa activación iónica están definidas por la fotolitografía, que inscribe con luz y ácidos las correspondientes configuraciones sobre la oblea (*véase el recuadro* "En tres dimensiones: el mismo utillaje, pasos distintos"). Para apiñar cada vez más transistores en una oblea es necesario utilizar luz de una longitud de onda cada vez más corta. Se han reemplazado las lámparas de vapor de mercurio por láseres excímeros que emiten en el ultravioleta profundo e inscriben elementos de 130 nanómetros; así se pueden poner más de mil millones de transistores en un chip. Nuevos perfeccionamientos deberían rebajar hasta 65 nanómetros el límite y llegar, tal vez, a los 16.000 millones de transistores.

Pero a partir de tal punto la senda puede ser muy escabrosa. Están empezando ahora a funcionar en el laboratorio sistemas litográficos que utilizan luz del ultravioleta extremo, aunque plantean todavía muchos e importantes problemas.

1. APILADAS VERTICALMENTE, estas células de memoria puede almacenar ocho bits de información en la misma superficie que normalmente se asigna a un solo bit. Con estos microchips tridimensionales se pretende reducir drásticamente el coste de la memoria digital.

Si la historia sirve de guía, es probable que se logren eliminar tales estorbos; el incentivo económico es enorme. Pero como aumenta el número de obstáculos, el ritmo de progresión puede verse considerablemente frenado. La "guía" oficial que publica la SIA (Asociación de Industrias de Semiconductores) estima que la superficie de los chips crecerá de un 4 a un 5 por ciento anual; históricamente ese crecimiento ha rondado el 15 por ciento anual. La reducción periódica de un 30 por ciento del tamaño del elemento mínimo va a producirse ahora cada tres años en lugar de cada dos. Pero incluso a este paso más tranquilo son muy grandes las probabilidades de que la ley de Moore tropiece con los límites fundamentales entre 2010 y 2020.

Hay un factor importante que se ha mantenido más o menos constante: el precio del suelo de semiconductor, entre 4 y 5 mil millones de euros por hectárea. ¿Por qué no han tomado los promotores de ese

El autor

THOMAS H. LEE fue diseñador de circuitos de Analog Devices en 1990, tras doctorarse en el M.I.T. En 1992 ingresó en Rambus, donde desarrolló circuitos analógicos de alta velocidad para chips de memoria. Sus trabajos se incorporaron también a microprocesadores de Advanced Micro Devices y Digital Equipment Corporation. En 1994 entra a formar parte del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Stanford, donde ha centrado sus investigaciones en circuitos de comunicaciones a gigahertz. Es conferenciante de dos sociedades profesionales y la fundación Packard le ha concedido una de sus becas de investigación. Le han sido otorgadas 14 patentes en los EE.UU., entre ellas cuatro para la construcción y fabricación en masa de circuitos integrados tridimensionales.

suelo la decisión, aparentemente obvia, de edificar hacia lo alto? La razón más sencilla es que los transistores son más rápidos y más fiables cuando se construyen a partir de los átomos perfectamente alineados de una oblea cortada de un solo cristal de silicio.

En cuanto se recubre esa oblea semiconductora con óxido aislante o hilo metálico no hay forma conocida de recuperar la regularidad cristalina que está debajo. Vendría a ser como atinar con el motivo de un suelo entarimado después de haberlo cubierto con una alfombra. El silicio depositado sobre una superficie no cristalina tiende a quedar completamente desordenado, en estado amorfo. Sometido a un tratamiento térmico adecuado se logra que forme diminutas islas ("gránulos") de material monocristalino, pero en las fronteras entre los gránulos las ordenadas hileras de átomos chocan bruscamente y forman cualquier ángulo entre sí. Los contaminantes pueden acumularse en estas barreras y cortocircuitar cualquier transistor o célula de memoria situada en medio. Durante muchos años, los dispositivos basados en silicio amorfo o en polisilicio (abreviatura de silicio policristalino) han sido tan malos, que nadie había pensado seriamente en utilizarlos para cosa alguna, como no fuese para las células fotovoltaicas.

En los primeros años ochenta, sin embargo, un prematuro temor a que la ley de Moore estuviera próxima a dejar de cumplirse sirvió de acicate para una serie de tentativas de fabricar microcircuitos tridimensionales, chips donde los transistores no se extendieran horizontalmente, como puentes, sino que levantaran torres de silicio. En Stanford, James F. Gibbons y otros se valieron de haces de láser para mejorar la calidad de las películas de silicio depositadas sobre sustratos no silíceos. Otros trataron de apilar, unos sobre otros, chips bidimensionales ordinarios. Lamentablemente, el primer método era demasiado lento y el segundo demasiado caro para que resultasen económicamente competitivos. La fabricación tradicional de microcircuitos siguió por la misma vía de antes y los ingenieros dejaron de pensar en los circuitos verticales.

Resumen/*Microcircuitos tridimensionales*

- La complejidad de los microcircuitos basados en el silicio, de la que depende la industria informática, se topará pronto con limitaciones físicas fundamentales si, como dice la ley de Moore, sigue creciendo a un ritmo constante. La sustitución del silicio por otros tipos de material semiconductor sería enormemente cara.
- Los ingenieros han dado hace poco con una forma de prolongar la ley de Moore, e incluso de acelerar el ritmo del progreso notablemente. Han diseñado y producido a gran escala chips de múltiples capas, en los que las partes semiconductoras ya no están confinadas en un solo plano, sino que también se extienden en sentido vertical.
- Está previsto que este mismo año lleguen al mercado los primeros productos que incorporarán microchips tridimensionales, en concreto unas tarjetas de memoria que, al ser más baratas que las actuales, se podrán usar en la fotografía digital o para grabar sonido.

Nuevos usos para viejas herramientas

En 1997, Farmwald y yo empezamos a explorar nuevamente la posibilidad de construir chips tridimensionales; nos percatamos de la existencia de dos técnicas clave, ya desarrolladas con otros fines, que ofrecían la posibilidad de que tales estereocircuitos fuesen, por vez primera, verdaderamente prácticos. Una de ellas era un procedimiento para depositar polisilicio de modo tal que cada islote de silicio monocristalino fuese lo bastante grande como para albergar un gran número de células de memoria o de transistores. La segunda, no menos importante, consistía en un procedimiento para alisar cada capa de nuevo material de suerte que la torre no creciera torcida sobre el chip.

Hemos de agradecer a la industria de las pantallas planas el primero de esos avances. Logró construir millones de transistores a partir de una película delgada extendida sobre un sustrato grande y amorfo (el vidrio, en su caso; otros materiales, en el nuestro). Los transistores de película delgada pueblan hoy las pantallas de los ordenadores portátiles. Parte del secreto consiste en depositar el silicio a unos 400 ºC en forma de una película extraordinariamente lisa (pero no cristalina, sino amorfa), y a continuación hornear uniformemente la lámina entera durante unos pocos minutos a más de 500 ºC. De este modo la película de silicio amorfo se convierte en una de silicio policristalino, con regiones cristalinas regulares de una micra de diámetro o más. Aunque los paneles de las pantallas de cristal líquido requieren un solo estrato de transistores, las mismas máquinas que hacen esos paneles pueden fabricar también dispositivos con múltiples capas.

El segundo avance fundamental, la pulimentación químico-mecánica, fue un fruto de los laboratorios de investigación de IBM de finales del decenio de

EN TRES DIMENSIONES: EL MISMO UTILLAJE, PASOS DISTINTOS

FABRICACION DE UN CHIP BIDIMENSIONAL



1 Se proyectan configuraciones de luz ultravioleta sobre una oblea de silicio recubierta con un material fotosensible

2 Se elimina el material fotosensible que recibió luz; se graban en hueco las regiones desprotegidas atacándolas con gases

3 Se proyectan iones sobre la oblea para dopar el silicio remanente y crear así los transistores

4 La oblea es recubierta de dieléctrico (aislante) o de metal (conductor)

5 Un pulido mecánico-químico alisa la superficie de la oblea con una precisión de 50 nanómetros

EL PROCESO SE REPITE CUATRO VECES O MAS PARA AÑADIR INTERCONEXIONES METALICAS U OXIDOS AISLANTES

FABRICACION DE UN CHIP TRIDIMENSIONAL

Nuevas etapas crean, con los mismos materiales y utillaje, microcircuitos tridimensionales con muchos transistores de polisilicio apilados verticalmente

RETICULO (MASCARA)

LENTE

OBLEA DE SILICIO PREPARADA

Material fotosensible
Dióxido de silicio
Nitruro de silicio
Sustrato de silicio

1 2 La fotolitografía y el proceso de grabado se efectúan igual que en los chips planos

3 Se dopa el silicio mediante implantación de iones para crear transistores

4 Se añaden tres capas nuevas: polisilicio, metal de tungsteno y, luego, más polisilicio

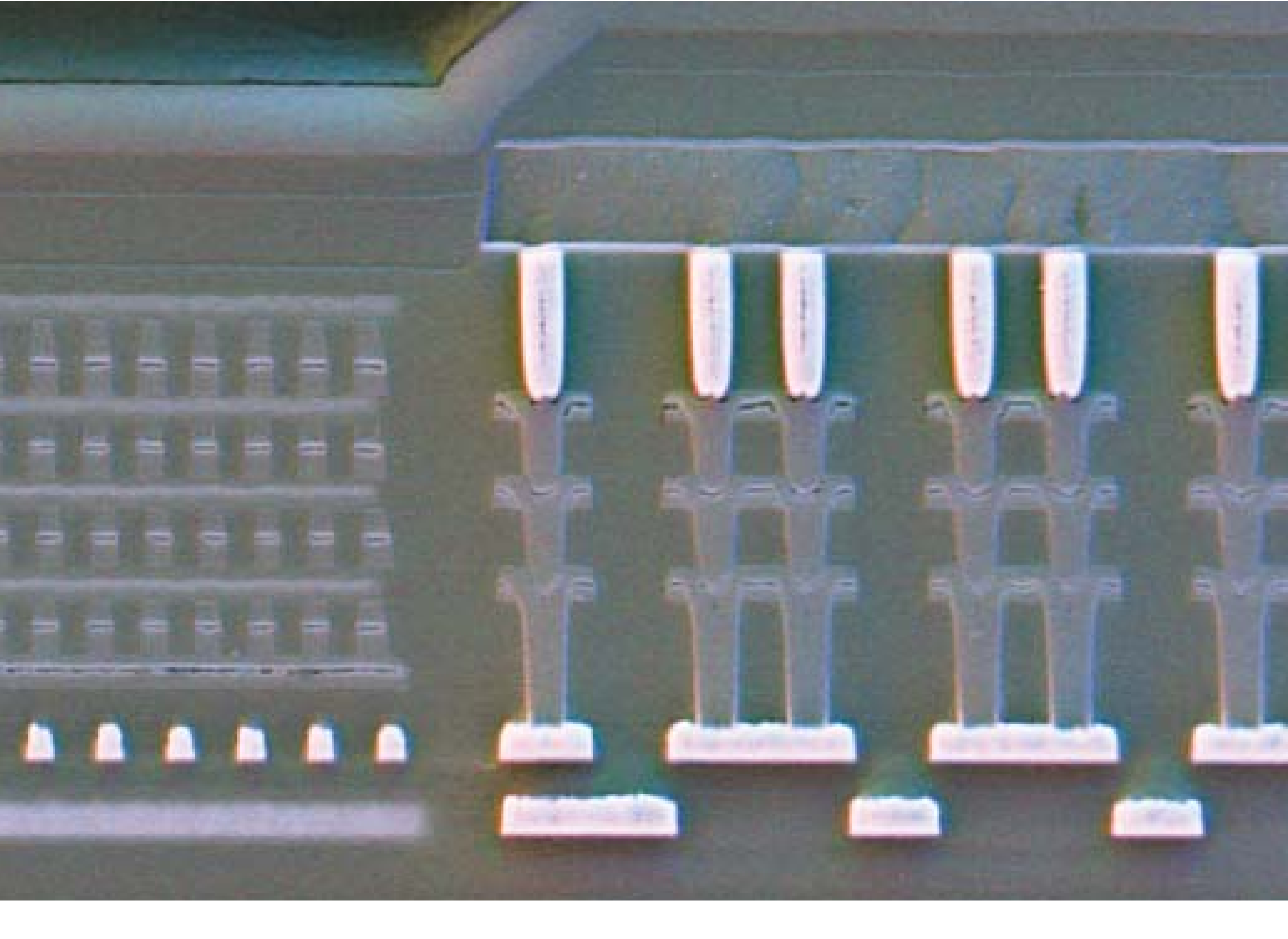
5 Se repite la fotolitografía para crear regiones activas de polisilicio

6 Se graban las células de memoria y las interconexiones metálicas; se añade aislante

7 Se eliminan las prominencias mediante un pulido químico-mecánico

8 Se aporta una capa de material infusible; quemándola es como se almacena un bit en la memoria

EL PROCESO SE REPITE NUEVE VECES PARA APILAR OCHO CELULAS DE MEMORIA



2. LAS CAPAS DE POLISILICIO que forman la colmena de células de memoria (*izquierda*) están interconectadas mediante "vías" (*columnas de la derecha*), las cuales, a su vez, se hallan interconectadas por hilos de tungsteno (*estructuras brillantes*).

1980. Por entonces, los diseñadores de microcircuitos consideraban arriesgado depositar dos o tres capas de metal sobre la oblea de silicio porque cada estrato nuevo hacía que apareciesen más montículos y vallecillos que ponían difícil el mantener enfocadas las configuraciones fotolitográficas.

Con el fin de eliminar las irregularidades de cada capa, se adaptó al caso un ardid del que los fabricantes de lentes se valen para pulimentar espejos. La técnica básica se empleó ya en todos los procesadores Intel 80486: cada vez que se añade un nuevo estrato de silicio, de metal o de óxido aislante, la oblea se coloca boca abajo sobre una muñequilla. Seguidamente, se hacen girar en sentidos opuestos la muñequilla y la oblea, accionadas por unos vástagos, al tiempo que pasa entre ambas una lechada de abrasivos y reactivos químicos alcalinos. Al cabo de unos pocos minutos de pulimentación la oblea queda plana, con una tolerancia de 50 nanómetros, y convertida en un sustrato ideal para el procesamiento ulterior. Gracias a los perfeccionamientos del pulimentado químico-mecánico son corrientes los diseños de microcircuitos con siete u ocho capas de metal. Parece que el principal factor que pone el límite al número de estratos que se van añadiendo es la paciencia.

Basándonos directamente sobre estas dos técnicas bidimensionales, hemos construido circuitos tridimensionales. Recubríamos obleas ordinarias de silicio con muchas capas sucesivas de polisilicio (amén de las capas metálicas y aislantes necesarias), puliendo tras cada etapa hasta que la superficie quedara bien plana. Aunque los electrones no se desplazan con tanta facilidad en el silicio policristalino como en el monocristalino, en los trabajos de investigación se han logrado producir transistores tridimensionales con una movilidad electrónica igual a un 90 % al 95 % de la que se tiene en los transistores bidimensionales.

La pila vertical de dispositivos ofrece una manera de esquivar los graves obstáculos que amenazan con hacer descarrilar a la ley de Moore. A medida que los chips de dos dimensiones siguen extendiéndose a modo de una galería comercial, cada vez resulta más difícil mantener la imagen litofotográfica enfocada en los bordes. Y los hilos, largos para la escala del dispositivo, que conectan en los microprocesadores tradicionales las secciones más alejadas,

causan demoras que reducen el rendimiento y complican el diseño.

La incesante reducción de tamaño de los circuitos plantea otros problemas. Para los transistores es fundamental la fina capa aisladora que se extiende bajo el electrodo de control. En los microcircuitos de dos dimensiones más avanzados, esta capa aislante de dióxido de silicio mide sólo tres nanómetros —alrededor de dos docenas de átomos— de espesor. De transistor a transistor, ese espesor no debe variar en más de uno o dos átomos. La industria afronta rutinariamente este problema porque es más fácil formar películas superfinas que excavar canales ultraestrechos. Pero tal vez no exista una manera práctica de lograr que estas películas aislantes sean todavía mucho más delgadas, porque el flujo de electrones debido al efecto túnel cuántico hace que vayan siendo peores aislantes a medida que adelgazan. Es verosímil que algún otro material tenga que reemplazar a no tardar al dióxido de silicio, pero está por ver cuál sería.

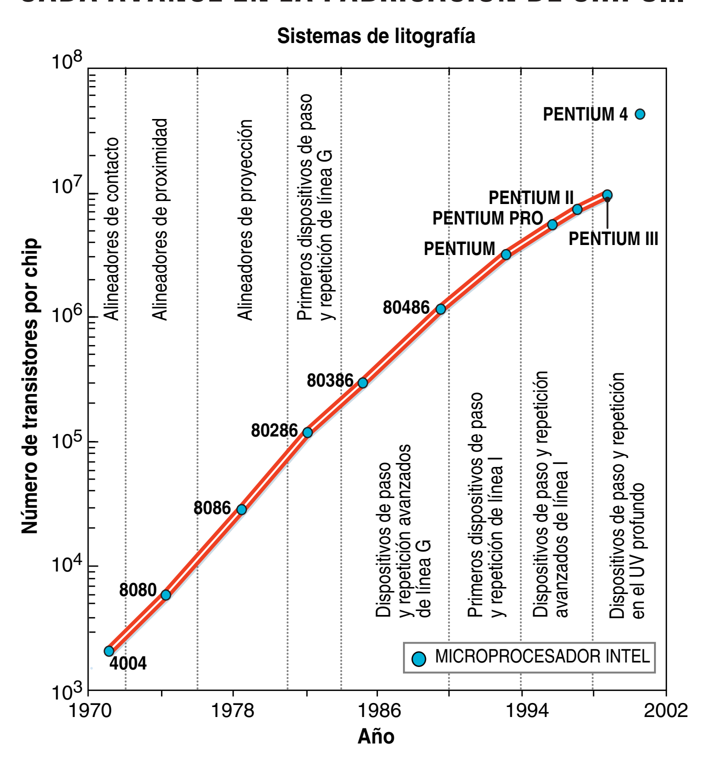
Han sido muchos los nuevos diseños de microcircuitos propuestos para abordar estos problemas. La mayoría se basa en sustituir por completo el silicio con diversos materiales exóticos: polímeros orgánicos, fullerenos de carbono, compuestos de cobre, materiales ferroeléctricos o aleaciones magnéticas. Ahora bien, el abandono del silicio entraña desperdiciar un tesoro de conocimientos fruto de más de 50 años de estudio y de una inversión de unos 100.000 millones de euros.

El proceso de diseño electrónico tridimensional, por el contrario, no recurre a nuevos átomos y saca partido de las enormes inversiones realizadas por la industria en el instrumental de la pulimentación químico-mecánica y de la fabricación de películas delgadas. Por ser tan onerosa la producción y procesamiento de los lingotes de silicio ultrapuro, el costo del silicio es en gran medida proporcional a la superficie (y no al volumen) consumido. Así pues, la electrónica vertical puede reducir los costos de fabricación a la décima parte, o menos, en comparación con los chips tradicionales. Y conforme se vayan añadiendo más capas la densidad de los dispositivos tridimensionales debería crecer, al menos, con tanta rapidez como dice la ley de Moore.

La fotografía digital y más

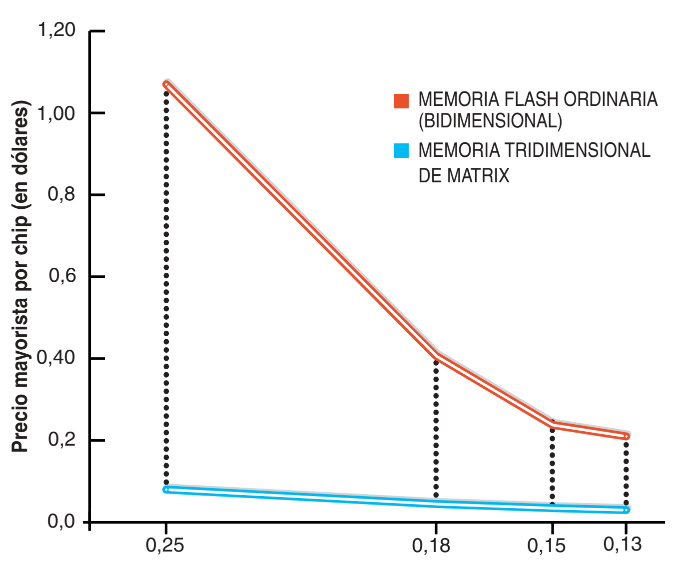
Tradicionalmente, los fabricantes de semiconductores han detectado y eliminado los fallos de un método nuevo produciendo chips de memoria antes de sacar microcircuitos más complejos, de tipo lógico por ejemplo. Las memorias son vastas formaciones de células de una gran sencillez; con ellas, pues, hay que darse menos maña y no son tantos los problemas.

CADA AVANCE EN LA FABRICACION DE CHIPS...



FUENTES: *VLSI Research, Inc.; Integrated Circuit Engineering Corporation; Intel*

... REBAJA EL COSTE UNITARIO



3. LA LEY DE MOORE dice que la complejidad de los microchips se multiplica por un mismo factor cada año, pero ese progreso perdió velocidad en torno a 1990, mientras se hacía por inventar sistemas fotolitográficos que grabaran en el silicio estructuras cada vez más pequeñas (*arriba*). Aunque las modificaciones estructurales multiplicaron el tamaño y el número de puertas en el Pentium 4, es probable que la ley de Moore se frene más todavía cuando los sistemas fotolitográficos pasen de la luz ultravioleta a los rayos X, mucho más difíciles de enfocar. Sin embargo, aumentando la complejidad vertical de los circuitos se puede conseguir la misma capacidad de cómputo a un costo mucho más reducido (*abajo*).

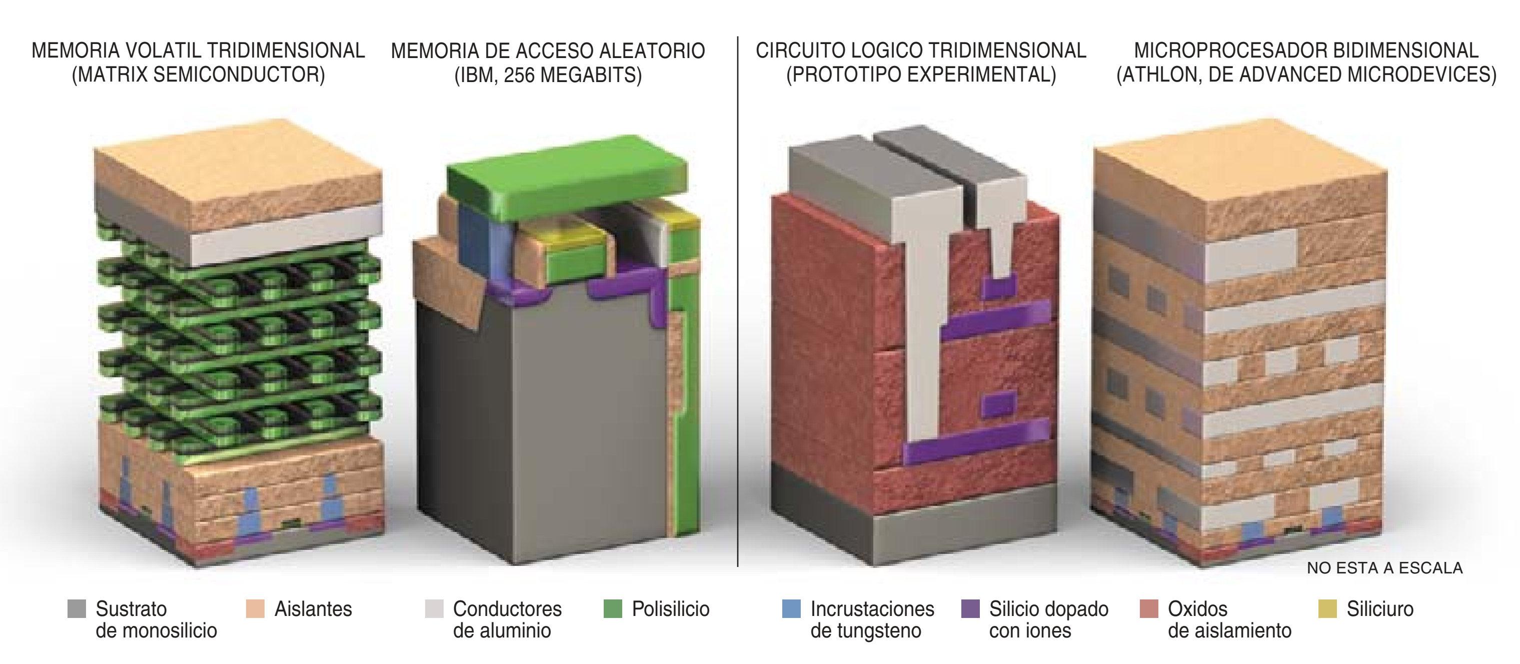
Eso mismo es lo que va a hacer Matrix; más entrado el año, presentaremos un chip de memoria tridimensional cuyas células forman torres de ocho pisos (*véase la figura 4*). A diferencia de las memorias RAM de los ordenadores personales, estas nuevas utilizan células de memoria de extrema sencillez. Casi recuerdan más a una película fotográfica, indeleble una vez impresionada. La idea es que sean un medio económico para la fotografía y la grabación de sonido digitales. Este primer microchip de estructura vertical, con sus 512 millones de células de memoria, posee capacidad suficiente para almacenar más de una hora de sonido de alta calidad (mediante compresión de datos) y un par de cientos de fotografías (compuesta cada una, aproximadamente, por un millón de píxeles). Con el tiempo tal capacidad aumentará y el costo por unidad descenderá. Hemos demostrado ya que son factibles los dispositivos de 12 pisos de altura. Todo indica que los microcircuitos de 16 capas están perfectamente a nuestro alcance.

En el laboratorio hemos puesto en servicio circuitos tridimensionales mucho más complejos: chips de RAM estática, puertas lógicas, hasta memorias EPROM borrables. Aunque se encuentran en los primeros estadios de desarrollo, estos bloques constructivos básicos son todo cuanto se requiere para remodelar en tres dimensiones un circuito plano cualquiera, se trate de memorias RAM dinámicas, memorias no volátiles, transceptores inalámbricos o microprocesadores. Puestos de pie, los transistores de estos circuitos podrán ser sumamente pequeños porque sus canales se harán con películas delgadas y serán diez veces más precisos que los canales definidos por la luz ultravioleta.

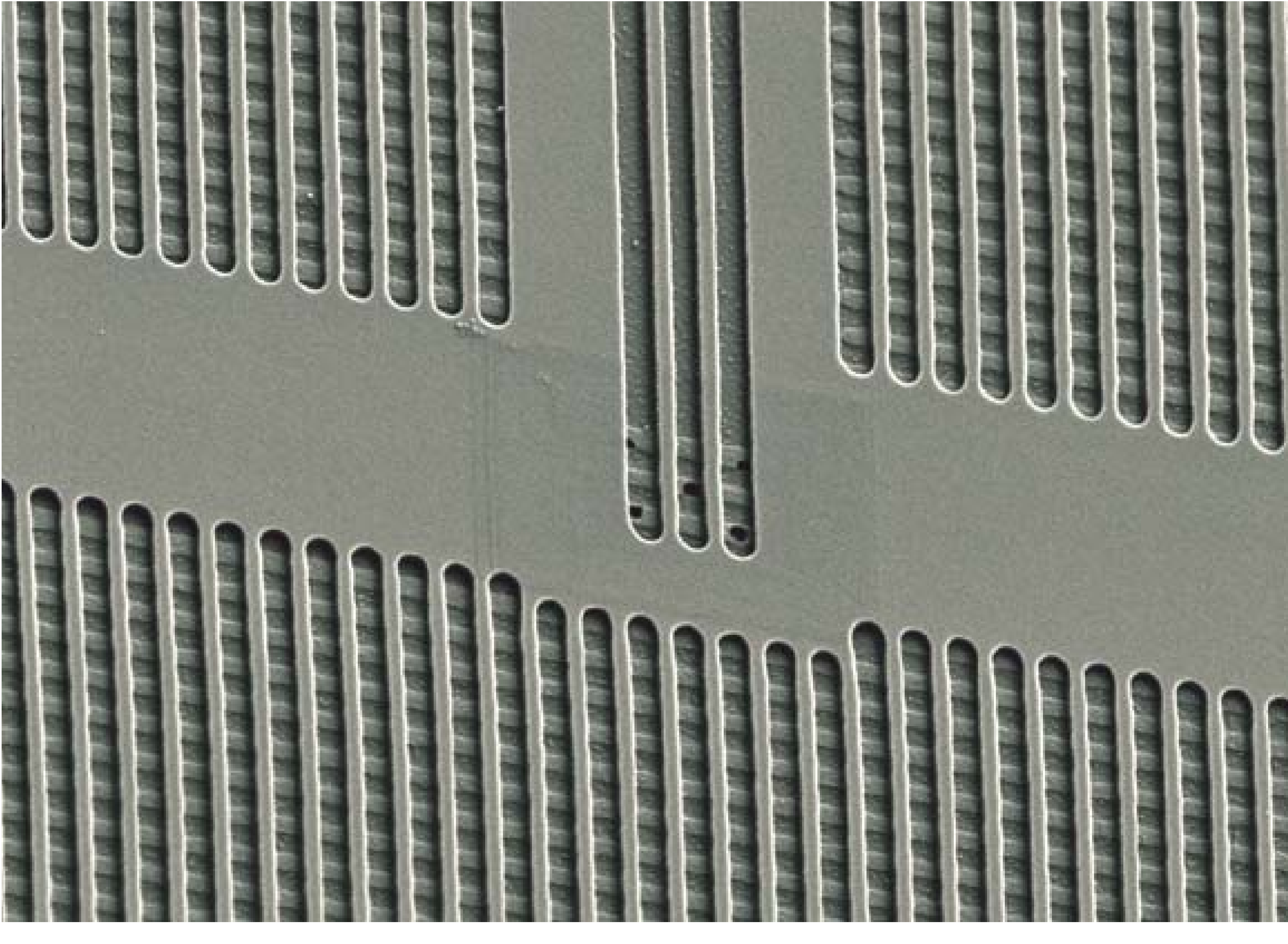
Como sucede con todos los avances de la ingeniería, en esta nueva técnica de fabricación hay también limitaciones y soluciones de compromiso. Una fracción de las células de memoria o de los transistores de un microcircuito vertical quedará a caballo sobre las fronteras que separan los gránulos de polisilicio; seguramente fallarán. Tendremos que usar rutinas de detección y corrección de errores, como en los discos compactos de música, y también dar con procedimientos que desvíen las señales cuando se topen con sendas defectuosas. Los métodos de computación tolerantes de los fallos, aunque son bien conocidos, no se han incorporado a los propios microchips. En la mayoría de los contextos planos estas técnicas son demasiado farragosas e innecesarias; felizmente, gracias a las reducciones de costos que se consiguen con las tres dimensiones estos métodos de reparación van a ser económicamente factibles justo cuando empiezan a necesitarse.

También en la velocidad habrá algún tipo de transacción. Los modernos transistores de película delgada funcionan más o menos a la mitad de velocidad que los dispositivos monocristalinos, si bien la diferencia es menor cuando se comparan circuitos completos porque los componentes empaquetados en tres dimensiones requieren líneas de conexión claramente más cortas. Numerosos investigadores están buscando la forma de reducir todavía más la diferencia.

Aparte de estas consideraciones especiales, los estereochips han de afrontar esencialmente las mismas dificultades que la electrónica plana corriente; si ciertos problemas apareciesen antes sería, sencillamente, porque se habría acelerado la ley de Moore. El problema más agudo para los dispositivos espaciales densos puede ser el calor, debido a que, en proporción, la superficie de disipación es menor. En un microprocesador moderno la densidad de potencia supera ya



4. LA ESTRUCTURA INTERNA de los chips tridimensionales difiere llamativamente de la estructura de las memorias y microprocesadores tradicionales, que son planos. En los microcircuitos ordinarios, sean lógicos o de memoria, todos los transistores se encuentran confinados en una sola capa de silicio. En los microcircuitos tridimensionales, los transistores o las células de memoria se forman dentro de múltiples estratos de silicio.



5. EL ALMACENAMIENTO PERMANENTE de bits en este chip tridimensional de memoria se produce cuando se destruyen sus infusibles (*puntos oscuros en el centro*), operación que establece una conexión entre las mitades de un circuito.

a la de los quemadores de una cocina típica. La ineficacia de las estrategias que se siguen hoy para disipar con la debida rapidez tan gran cantidad de calor —la reducción de las tensiones de funcionamiento o la activación selectiva de porciones de un circuito— quizá limite el rendimiento de los circuitos tridimensionales densos, a menos que se apliquen técnicas más avanzadas de enfriamiento. Por fortuna, los microrrefrigeradores más recientes logran ya retirar 200 watt por milímetro cuadrado con un consumo de sólo un watt. Así pues, las limitaciones térmicas no constituyen todavía un impedimento fundamental.

Cierto es que hay lugar para muchos perfeccionamientos. El cerebro humano, con su refrigeración líquida y unas dimensiones que superan considerablemente las de cualquier circuito tridimensional que pueda concebirse en nuestros días, disipa sólo unos 25 watt; un microprocesador Pentium 4 consume unos 80. Aunque no podemos descartar la posibilidad de que la incapacidad para resolver el problema del calentamiento pueda en última instancia imponer duras restricciones a lo que puedan hacer los circuitos tridimensionales, la historia lleva a pensar que los grandes incentivos económicos que están en juego harán que se dé con situaciones imaginativas.

Si se lograse que la vigencia de la ley de Moore se prolongara algunos años más de los previstos, las consecuencias serían de gran alcance. Durante 30 años los fabricantes de microcircuitos se han esforzado sin cesar en grabar estructuras cada vez más pequeñas en un solo plano. Parece inevitable que en el futuro la escala de los microcircuitos vaya siendo menor tanto horizontal como verticalmente. Las técnicas requeridas son a la vez posibles y prácticas, sin olvidar los beneficios, demasiado importantes para dejarlos de lado.

Bibliografía complementaria

MULTIPLE LAYERS OF CMOS INTEGRATED CIRCUITS USING RECRYSTALLIZED SILICON FILM, Victor W. C. Chan et al., en *IEEE Electron Device Letters*, vol. 22, n.º 2, páginas 77-79; febrero de 2001.



La economia del juego limpio

¿Por qué anteponemos la equidad y la cooperación al egoísmo? Este, a primera vista, parece más racional. ¿Cómo nace la generosidad darwinista? Biólogos y economistas se unen en la búsqueda de una explicación

Karl Sigmund, Ernst Fehr y Martin A. Nowak

Imagínese que alguien le ofrece cien euros. Usted lo único que tiene que hacer es ponerse de acuerdo con otra persona, de la que no sabe nada, en cómo se repartirán el dinero. Las reglas son estrictas. Están en habitaciones distintas y no pueden intercambiar información. Una moneda lanzada al aire decide quién propondrá cómo se reparte el dinero. Le ha tocado a usted. Sólo puede hacer una oferta de cómo se divide la suma; al otro jugador le compete aceptarla o rechazarla. Nada más. El otro conoce también las reglas y la cantidad total de dinero que debe repartirse. Si la acepta, se sella el trato. Si la rechaza, ambos se quedarán sin nada. En los dos casos se acaba el juego. No hay más opciones. ¿Qué haría usted?

Instintivamente, muchos piensan que habría que ofrecer el 50 % porque tal división es "justa" y, por tanto, es probable que se acepte. Lo único que puede hacer quien responde es decir sí o no a una cantidad dada de dinero. Si la oferta fuese del 10 %, ¿aceptaría usted los diez euros y dejaría que alguien se fuese con 90, o preferiría quedarse sin nada? ¿Y si sólo le ofreciesen el 1 %? ¿No es mejor un euro que ninguno? Recuerde que no se puede regatear. Sólo cabe la oferta, única, de quien propone: quien responde puede tomarlo o dejarlo.

¿Qué ofrecerá usted?

No le sorprenderá, seguramente, que dos tercios de las ofertas estén entre el 40 y el 50 por ciento. Sólo cuatro de cada cien personas ofrecen menos de un 20 %. Ofrecer una proporción tan pequeña es arriesgado; puede que se rechace. Pero algo no encaja ahí: ¿por qué iba alguien a rechazar una oferta por ser "demasiado pequeña"? A quien responde sólo le quedan dos opciones: aceptar lo que se le da o conformarse con nada. La única opción racional para un individuo egoísta es aceptar cualquier oferta. Un mísero euro es mejor que nada. Si quien propone es egoísta y está seguro de que quien responde lo es también, hará la menor oferta posible, pues, y se quedará con lo demás. El análisis de la teoría de juegos, que parte de que las personas son egoístas y racionales, le dirá que quien propone debe ofrecer la parte más pequeña que se pueda y que quien responde debe aceptarla. Pero la mayoría no juega así.

Esta situación que se acaba de describir, el juego del ultimátum, se estudia en una disciplina aún en esbozo, que progresa, sin embargo, a pasos agigantados: la economía experimental. Una parte extensa de la teoría económica trata de fenómenos a gran escala, como las fluctuaciones del mercado de acciones o del producto interior bruto. No obstante, es cada vez mayor la pasión de los economistas por las interacciones corrientes: el compartir y ayudar que se ve en los hogares, en las familias, en los grupos de niños, en los fondos de dinero que se hacen en las oficinas. ¿Cómo funciona el intercambio económico cuando no hay contratos explícitos o instituciones reguladoras?

Durante largo tiempo, los teóricos de la economía tuvieron como premisa la existencia de un ser llamado *Homo oeconomicus*, un individuo racional que no deja nunca de maximizar una retribución puramente egoísta. Pero del juego del ultimátum y de experimentos similares se extrae una lección distinta: las personas son un cruce de *H. oeconomicus* y de

Los autores

KARL SIGMUND, ERNST FEHR Y MARTIN A. NOWAK recibieron la invitación a escribir un artículo sobre el juego del ultimátum siempre y cuando se pusieran de acuerdo acerca de cómo se repartirían el trabajo, tarea que no es fácil para quienes conocen las soluciones racionales de los problemas de cooperación y equidad. Sigmund es profesor de matemáticas en la Universidad de Viena, Fehr dirige el Instituto de Investigaciones Empíricas sobre Economía de la Universidad de Zurich y Nowak se halla al frente del Programa de Biología Teórica del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

H. emoticus, una especie híbrida compleja que se rige tanto por la emoción como por la fría lógica y el egoísmo. ¿Cómo pudo haber creado la evolución darwinista criaturas con emociones y conductas que no parece que estén encaminadas directamente al mayor beneficio de los individuos o de sus genes?

Werner Güth, de la Universidad Humboldt de Berlín, concibió el juego del ultimátum hará unos veinte años. Los experimentadores lo estudiaron después a fondo en muchos lugares y con sumas distintas. Era notable la indiferencia de los resultados ante los factores cambiantes. La conducta que se seguía en el juego no dependía apreciablemente del sexo, de la edad, de los años de estudios o de la habilidad con los números. Llamaba asimismo la atención cuán poco influía en los resultados la cantidad de dinero en juego. En Indonesia, por ejemplo, la suma que había que compartir era nada menos que el triple de los ingresos mensuales medios de los individuos puestos a prueba, y aun así rechazaban indignados las ofertas que consideraban demasiado pequeñas. La variedad de los jugadores, eso sí, seguía siendo bastante limitada; los estudios se hicieron sobre todo en países desarrollados, como los occidentales, China y Japón, y además, muy a menudo, con estudiantes universitarios.

Hace poco, un ambicioso estudio intercultural de quince sociedades pequeñas en cuatro continentes ha mostrado que sí había diferencias notables en el comportamiento de ciertas gentes durante el juego del ultimátum. En la tribu amazónica de los machiguenga, la oferta media era considerablemente inferior a la corriente en las civilizaciones occidentales: un 26 % frente a un 45 %. Por el contrario, muchos miembros de la tribu de los au, de Papúa Nueva Guinea, ofrecían más de la mitad del pastel. Las tradiciones culturales relativas a los regalos y las fuertes obligaciones que se derivan de aceptar uno desempeñan un papel principal en algunas tribus, como la de los au. Estos papúes tendían a rechazar tanto las ofertas demasiado generosas como las mezquinas. Sin embargo, pese a tales variaciones culturales, el resultado caía siempre lejos de lo que dictaba el análisis racional de unos jugadores egoístas. En todo el mundo la mayoría valora mucho los resultados equitativos; es fuerte el contraste con lo que unos maximizadores egoístas de su propia renta harían.

Resumen/Juego limpio

- Se da en todas las culturas un elevado y emocional aprecio por la equidad.
- En estos experimentos los jugadores son a menudo más generosos de lo que predice el análisis de la teoría de juegos. Parte ésta de la premisa según la cual las personas buscan con egoísmo maximizar sus ganancias. Recíprocamente, el juego sucio incita costosos actos de venganza. El resultado es un juego más equitativo que lo predicho.
- Puede que la evolución haya producido en los seres humanos las emociones que intervienen en esas conductas durante los millones de años que el hombre lleva viviendo en grupos pequeños. Esas emociones nos incitan a comportarnos de un modo que, a largo plazo, resultó provechoso para nosotros o para nuestro grupo.

Hay numerosas situaciones de la vida diaria donde se produce un toma y daca entre el egoísmo y el juego limpio. Un compañero, por ejemplo, le invita a colaborar en un proyecto. Usted lo hará a gusto si espera una retribución justa a su inversión de tiempo y de energía, o si su compañero le ayudó en el pasado. El juego del ultimátum en su forma pura tiene, en cambio, unas limitaciones artificiales que rara vez se dan en las interacciones reales: no se puede regatear, los participantes no se conocen, el premio desaparece si no se reparte a la primera y el juego no se repite nunca. Pero esas limitaciones no constituyen un inconveniente; gracias a ellas estudiamos el comportamiento humano en situaciones bien definidas, a fin de descubrir los principios fundamentales que gobiernan los mecanismos de nuestra toma de decisiones. Recuerda en cierto sentido al proceder de los físicos, que provocan la colisión entre partículas en un vacío para estudiar sus propiedades.

Las emociones entran en juego

Los economistas han explorado muchas variantes del juego del ultimátum para hallar las causas del comportamiento emocional que suscita. Si, por ejemplo, no se elige al jugador que propone echando una moneda al aire sino por haber respondido mejor a unas preguntas, las ofertas son de ordinario un poco menores y se aceptan con mayor facilidad (se percibe que la desigualdad está justificada). Si la elige un ordenador, el jugador que responde estará dispuesto a aceptar una cantidad considerablemente menor de dinero. Y si compiten varios por convertirse en el único que acepte la oferta de un solo proponente, éste puede salirse con la suya ofreciendo una cantidad pequeña.

Estas variaciones apuntan a una conclusión: en las confrontaciones de dos personas no adoptamos un punto de vista puramente egocéntrico, sino que tomamos en cuenta cómo verá las cosas quien juega con nosotros. No estamos interesados sólo en nuestra retribución, sino que nos comparamos con la

otra parte y exigimos que se juegue limpio.

¿Por qué le damos tanto valor a la equidad y rechazamos el 20 % de una suma grande sólo porque el otro jugador se lleva el cuádruple? Las opiniones están divididas. Algunos expertos en teoría de juegos creen que los individuos no comprenden que sólo interaccionarán una vez y ven la oferta, o su rechazo, sólo como la primera fase de un proceso incipiente de negociación. Regatear acerca de la parte que le toca a uno de un bien debe de haber sido algo con lo que nuestros antepasados se encontraron una y otra vez. Pero, ¿tan difícil es darse cuenta de que el juego del ultimátum es una interacción que se produce una sola vez? Los indicios procedentes de varios otros juegos enseñan que los individuos experimentales son plenamente conscientes de la diferencia entre los enfrentamientos únicos y los repetidos.

Otros han explicado nuestra insistencia en que el reparto sea equitativo apelando a la necesidad que nuestros antepasados sentían de refugiarse en un grupo fuerte. Los grupos de cazadores y recolectores dependían para su supervivencia de la maña y vigor de sus miembros. No vale de nada ganar al rival si con ello no podemos fiarnos de él cuando haya que pelear con otros grupos. Pero este argumento puede explicar como mucho por qué los proponentes ofrecen cantidades grandes, no la razón de que rechacen ofertas bajas quienes responden.

Karen M. Page, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, junto con Nowak y Sigmund, coautores del artículo, han estudiado un modelo evolutivo que sugiere una respuesta: millones de años de vida en grupos reducidos, donde resulta difícil guardar secretos, han conformado nuestro sistema emocional. Nuestras emociones no están, por eso, bien afinadas para unas interacciones que se produzcan en el estricto anonimato. Esperamos que nuestros amigos, compañeros y vecinos se percaten de nuestras decisiones.

Si otros saben que me quedo contento con una parte pequeña es probable que me hagan ofertas nimias; si conocen que me enfado cuando se me hace una oferta pequeña y que rechazo el trato, los demás se verán movidos a hacerme ofertas mayores. Por consiguiente, la evolución debió de favorecer que se respondiese emocionalmente a las ofertas bajas. Como las interacciones sin repetición fueron raras durante la evolución humana, esas emociones no discriminan entre interacciones sin repetición e interacciones repetidas. Ahí reside el motivo de que muchos respondamos emocionalmente a ofertas bajas en el juego del ultimátum. Puede que nuestro sentimiento sea que debemos rechazar una oferta decepcionante a fin de mantener nuestra autoestima. Desde un punto de vista evolutivo, la autoestima es un dispositivo interno para la adquisición de una reputación, que beneficiará en confrontaciones futuras.



El juego del ultimátum, con su suma simplicidad, es un ejemplo básico del tipo de juegos de que se valen los economistas experimentales: son muy abstractos; a veces consisten en elaboradas interacciones entre agentes independientes que toman decisiones. Los fundadores de la teoría de juegos, el matemático húngaro John von Neumann (uno de los padres de los ordenadores) y el economista austríaco Oskar Morgenstern, que colaboraron en Princeton en el decenio de 1940, se valían de juegos de mesa, como el póquer y el ajedrez, para ilustrar sus ideas. Sin la menor duda, los juegos de mesa constituyen abstracciones de las interacciones sociales o económicas, pero la mayoría son de suma cero: lo que gana un jugador lo pierde el otro. Por el contrario, en la vida real la mayoría de las interacciones económicas son mixtas: inter-



vienen elementos de cooperación y de competición. Modelan semejante situación los llamados juegos de bienes públicos.

Es dulce la venganza

En uno de los juegos de bienes públicos más sencillos participan cuatro jugadores. El experimentador da a cada uno veinte euros, y han de decidir, con independencia los unos de los otros, cuánto invertirán en un fondo común. El experimentador dobla el fondo común y lo distribuye entre los cuatro miembros del grupo.

Si cada jugador contribuye con sus veinte euros, todos doblan su capital. La cooperación es muy rentable. Pero la tentación de retener la propia contribución es grande. Un jugador egoísta no pondría nada, porque de cada euro que invierta sólo cincuenta céntimos volverán a su cuenta. (El experimentador dobla el dinero, pero luego se divide por cuatro entre los jugadores.) El experimentador se asegura de que los jugadores entienden perfectamente esto preguntándoles que calculen con cuánto acabaría cada uno si, digamos, Alicia pone 10 euros, Roberto y Carolina sólo cinco y Daniel nada en absoluto. Tras estos preparativos se juega de verdad. Si todos siguiesen la estrategia racional egoísta predicha por los economistas, no se invertiría nada y nadie mejoraría sus veinte euros de partida. La gente no juega así en la realidad; la mayoría invierte al menos la mitad de su capital.

Si el mismo grupo repite el juego diez veces, los individuos seguirán invirtiendo alrededor de la mitad de su capital durante las primeras rondas. Pero hacia el final la mayoría no invertirá ya nada. Este declive desde un nivel alto de cooperación se interpretaba antes como un proceso de aprendizaje: los jugadores aprenden la estrategia egoísta a las malas, a golpe de decepciones. Pero ésta no puede ser la explicación correcta, ya que otros experimentos han mostrado que la mayoría de los jugadores que se incorporan a grupos nuevos, con otros jugadores a los que no conocían de antes, vuelven a empezar con contribuciones grandes. ¿Cuál es la justificación de este comportamiento?

Los experimentos que hemos hecho uno de nosotros (Fehr) y Simon Gächter, de la Universidad suiza de St. Gallen, muestran que el juego de bienes públicos sufre un giro espectacular si se añade una nueva opción: la de castigar a los otros jugadores. En estos experimentos los jugadores pueden multarse unos a otros al final de cada ronda, pero sólo con un coste. Si Alicia quiere ponerle a Daniel una multa de un euro, deberá ella pagar 30 céntimos. El euro y los 30 céntimos vuelven al experimentador. El costo hace que el castigo sea injustificable desde el punto de vista egoísta (Alicia reduce su capital y no gana nada a cambio). No obstante, la mayoría de los jugadores se muestran muy dispuestos a, y hasta ansiosos por, multar a quienes vayan quedándose cortos en sus contribuciones. Parece que todos anticipan que será así; incluso en una partida con una sola ronda hay menos abstenciones de lo usual. Lo más significativo es que, si el juego se repite un número de veces fijado de antemano y conocido, la voluntad de contribuir no decae. Muy al contrario: las contribuciones al fondo común suben con el tiempo, y en las últimas rondas más del 80 % de los miembros del grupo invierte todo su capital; es llamativa la diferencia con el resultado del juego sin castigos.

En un juego repetido, los jugadores pueden considerar el castigo como una inversión astuta e interesada en la educación de otros jugadores: se enseña a los aprovechados a contribuir para beneficio común. Incurrir en costos para penalizar a los agarrados puede proporcionar beneficios a largo plazo. Pero una variación reciente del

juego de los bienes públicos muestra que ese criterio económico es sólo un aspecto secundario. En ella se juntan numerosos grupos de cuatro jugadores. Tras cada ronda se los redistribuye de manera que no vuelvan a coincidir dos de ellos. No cambia la pauta de los castigos (ni el alto nivel de las inversiones): se penaliza con tanta severidad a los aprovechados como cuando todo el mundo permanece en los mismos grupos; las inversiones también empiezan altas y pueden subir. Este resultado es asombroso, ya que se ha eliminado el "rédito de la educación". Como antes, recibir una multa hace que el jugador aumente sus inversiones venideras, pero ese aumento nunca beneficia a quien impone la multa. No obstante, muchos jugadores se muestran muy inclinados a castigar a los abstencionistas. Parece que los participantes experimentan un placer primigenio en ponerles las cosas en su sitio a los aprovechados. Se muestran más interesados en vengarse personalmente que en aumentar su rendimiento económico total.

¿Por qué hay tantos jugadores dispuestos a pagar el precio de castigar a los listos sin sacar beneficio material alguno de ello? El economista evolutivo Herbert Gintis, de la Universidad de Massachusetts, ha demostrado que esa conducta podría ofrecer ventajas adaptativas. En su modelo, los grupos sociales con un porcentaje de castigadores superior a la media son más capaces de superar guerras, pestes, hambrunas y otros desastres por el estilo, que amenacen al grupo entero con la extinción o la dispersión. En esas situaciones se quiebra la cooperación entre agentes con intereses propios porque es muy improbable que haya interacciones futuras entre los miembros del grupo. Los castigadores disciplinan a los agentes que obedecen a intereses propios, por lo que resulta harto más probable que sobreviva el grupo. Los individuos que castigan no son, claro, conscientes de este mecanismo evolutivo. La venganza, sencillamente, les sabe dulce.

La gente espera que haya equidad y solidaridad dentro de la mayoría de los grupos, sea de niños en un campamento de verano o de jefes de la Mafia. En última instancia, los criterios morales determinan una parte esencial de la vida económica. ¿Cómo pudo la evolución crear semejantes formas de conducta social? Esta es una cuestión central de la teoría darwinista. Puede que parezca difícil de casar la abundancia de actos altruistas —que aprovechan a quienes los reciben, pero les cuestan a los donantes— con la idea del gen egoísta, según la cual la evolución actúa sólo, en su nivel básico, para promover los genes más aptos en obtener su propia proliferación. Los beneficios y los costes se miden en la moneda biológica final: el éxito en la reproducción. No es probable que se extiendan entre la población genes que reduzcan ese éxito.

Generosidad darwinista

El estrecho parentesco entre los individuos explica el enorme grado de cooperación de los insectos sociales. Pero la cooperación humana se da también entre quienes no están emparentados; nace de los lazos económicos, no de los genéticos. No obstante, los biólogos han mostrado que numerosos tipos altruistas de comportamiento hallan explicación en términos de éxito biológico. Otros sostienen que interviene una segunda forma de evolución, una evolución de las ideas, o "memes" [*véase* "El poder de los memes", de Susan Blackmore, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2000.]

Quizá parezca que reducir el altruismo a consideraciones de coste y beneficios, especialmente si se originan en necesidades biológicas, revela insensibilidad. Muchos preferimos pensar que nuestras acciones generosas proceden de nuestro carácter noble. Nos sentimos mejor si ayudamos a otros y compartimos algo con ellos. Pero, ¿de dónde viene ese bienestar interno? Tiene una función biológica. Comemos y copulamos porque gozamos con ello, pero tras el placer se alza el programa evolutivo que nos ordena que sobrevivamos y procreemos. De manera semejante, las emociones sociales —la amistad, la vergüenza, la generosidad, la culpa— nos acicatean a lograr éxitos biológicos en redes sociales complejas.

Hace un par largo de siglos los filósofos David Hume y Jean Jacques Rousseau recalcaron el papel crucial de la "naturaleza humana" en las interacciones sociales. Los economistas teóricos, por el contrario, prefirieron durante mucho tiempo estudiar su egoísta *Homo oeconomicus*. Dedicaron singular empeño a teorizar sobre el modo en que un individuo solitario —un Robinsón en alguna isla desierta— escogería entre diferentes grupos de bienes. Pero no somos robinsones. Pertenecemos a un linaje social con 30 millones de años de historia. Y en las interacciones sociales nuestras preferencias distan a menudo de ser egoístas.

Los patrones éticos y los sistemas morales difieren de una cultura a otra, pero podemos presumir que se basan siempre en capacidades universales que tienen raíces biológicas, de la misma forma que miles de lenguajes diferentes se basan en un instinto lingüístico universal. A Hume y Rousseau apenas si les sorprendería. Hemos llegado a una etapa en que podemos formalizar sus ideas mediante modelos de la teoría de juegos, modelos susceptibles de análisis matemático y comprobación experimental.

Bibliografía complementaria

FAIRNESS VERSUS REASON IN THE ULTIMATUM GAME. Martin A. Nowak, Karen M. Page y Karl Sigmund en *Science*, vol. 289, págs. 1773-1775; 8 de septiembre, 2000.

COOPERATION AND PUNISHMENT IN PUBLIC GOODS EXPERIMENTS. Ernst Fehr y Simon Gächter, en *American Economic Review*, vol. 90, n.º 4, págs. 980-994; septiembre 2000.

IN SEARCH OF HOMO ECONOMICUS: BEHAVIORAL EXPERIMENTS IN 15 SMALL-SCALE SOCIETIES. Joseph Henrich, Robert Boyd, Samuel Bowles, Colin Camerer, Ernst Fehr, Herbert Gintis y Richard McElreath, en *American Economy Review*, vol. 91, n.º 2, págs. 73-78; mayo 2001.

Marco Cattaneo y Sergio Pistoi

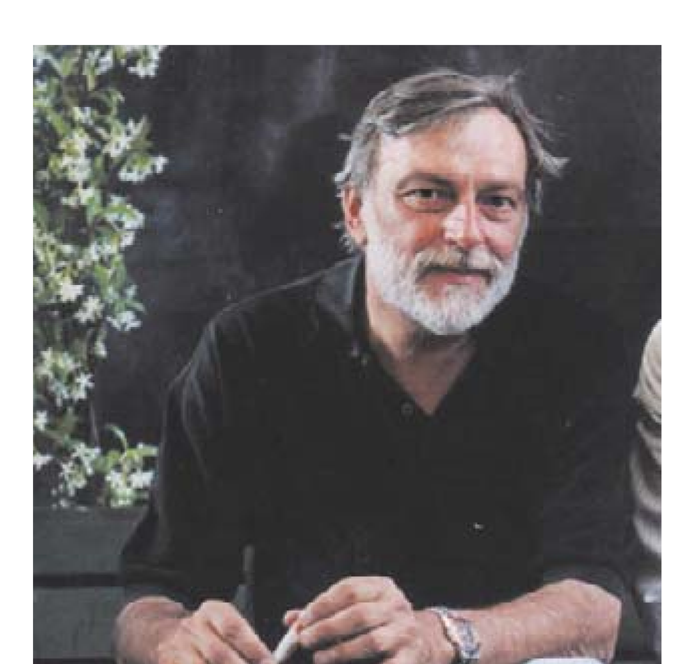
GINO STRADA: Cirugía de campaña

A finales de octubre de 2001, tres cohetes Katiuska, lanzados por los talibanes en represalia por los bombardeos estadounidenses, alcanzaron el mercado de la pequeña ciudad de Charikar, en territorio controlado por sus enemigos de la Alianza del Norte. En el ataque murieron dos personas y 25 resultaron heridas. Las víctimas, todas civiles, entre las que se encontraban muchas mujeres y niños, fueron llevadas a toda prisa por una bacheada carretera hasta Anabah, en la profunda garganta del valle de Panjshir. Allí, a 60 kilómetros de Kabul, se encuentra el único hospital del norte de Afganistán equipado con todos los pertrechos de la medicina moderna: sala de urgencias, instalaciones de radiología, dos quirófanos totalmente equipados con suministro de oxígeno, un laboratorio clínico, esterilizadores, banco de sangre, unidad de cuidados intensivos y cuatro salas con camas para 70 pacientes.

En un país sin apenas electricidad, servicio telefónico y agua corriente, el hospital, un pulcro edificio blanco de una planta, parece un espejismo recortado contra el impresionante telón de fondo de la cordillera del Hindu Kush. En las fachadas ostenta un emblema de tres bandas rojas, distintivo de la organización internacional de ayuda Emergency, una ONG con sede en Milán.

El pequeño hospital de Anabah no pasa inadvertido para el resto del mundo. Pocas horas después, un hombre corpulento, rudo, un poco desaliñado, de barba cana, aparece en la televisión italiana. Gino Strada, cirujano jefe del hospital, de 53 años, cofundador de Emergency, está clasificando a los heridos para llevarlos al quirófano.

Strada era antes especialista en trasplantes de corazón y de pulmón, parecía destinado a una vida confortable, pasaba temporadas como cirujano visitante en las universidades de Stanford y Pittsburgh. Esa vida quedó transformada para siempre en 1988, cuando quiso experimentar por sí mismo cómo se proporciona la asistencia médica en el tercer mundo. Un destino de cinco años en el Comité Internacional de la Cruz Roja lo llevó a Afganistán, Pakistán, Perú, Bosnia, Etiopía, Djibuti, Somalia, a los campos de refugiados camboyanos en Tailandia. Poco satisfecho de la calidad de la asistencia ofrecida por el Comité, se estableció por su cuenta. Con la ayuda de Teresa, su mujer, y de un grupo de amigos fundó Emergency. La asociación se dedica a proporcionar una asistencia sanitaria comparable a la que él conocía en Milán o Palo Alto en los puntos conflictivos del globo.



Levantar hospitales en sociedades diezmadas por años de guerra requiere una habilidad que va más allá de saber cerrar suturas. La labor de Emergency en Afganistán ilustra las dificultades que encuentra doquiera que vaya. En 1999, Strada y sus colegas volaron en un destartalado helicóptero soviético desde Dushanbe, en Tajikistán, hasta el norte de Afganistán, y de allí siguieron en camión para entrevistarse con el depuesto presidente afgano Burhanuddin Rabbani y el jefe de las fuerzas militares de la oposición, Ajmed Shah Massud (asesinado el 9 de septiembre de 2001 con unas bombas detonadas por suicidas). Los líderes de la Alianza del Norte dieron su consentimiento a la propuesta de construir el hospital de Anabah. La necesidad del establecimiento era insoslayable.

Strada y sus colaboradores de Emergency remozaron una academia de policía abandonada; se valieron de viejas cajas de munición soviéticas para el techo y de tubos de carros blindados para las cañerías. El equipamiento del hospital requirió 21 días de traslado en camión desde Tajikistán. Se construyó de modo que fuera completamente autónomo; alberga sus propios generadores eléctricos e incluso una sala para que jueguen los niños (que constituyen más de un tercio de los pacientes). También se dispusieron seis puestos de primeros auxilios en el frente de la Alianza del Norte y aprestaron seis vehículos todo terreno para que sirviesen de ambulancias. El hospital, desde su inauguración en diciembre de 1999, ha tratado ya a más de 8400 personas, la mayoría víctimas civiles de las minas antipersonales y de las bombas. La mortalidad de los pacientes se cifra en un envidiable 3,5 por ciento. Desde el comienzo de los bombardeos angloamericanos del otoño pasado, Emergency ha sido uno de los escasos grupos de ayuda internacional que han permanecido en Afganistán sin interrupción. Y a pesar del conflicto, Strada no ha renunciado a los planes de expansión. "Estamos montando nuevos departamentos de obstetricia, pediatría y cirugía oftalmológica", dice.



El hospital de Emergency se levanta como un espejismo en las faldas del Hindu Kush

Aunque la creación de Emergency fue sobre todo cosa de Strada, no ha intentado crear un culto a la personalidad. Otros miembros de Emergency han mostrado en Afganistán tanto entusiasmo como él. En mayo de 2001, Kate Rowlands, una enfermera galesa de 45 años, fumadora empedernida, coordinadora del grupo médico en Afganistán, plantó cara a los talibanes del Ministerio de la Prevención y Promoción de la Virtud, armados con fusiles ametralladores Kalashnikov y látigos de cuero. Pese a todo, invadieron el recién abierto hospital de Emergency en Kabul y azotaron a los trabajadores con los látigos por su "promiscuidad": se referían a que hombres y mujeres comían juntos. Más tarde, la emisora en lengua pastún del gobierno, Radio La Voz de la Sharia, informó de que el hospital "había nombrado al personal de servicio como bien le había parecido, sin el consentimiento del Ministerio de Salud Pública, quebrantando todas las leyes y reglamentos al tener un comedor mixto".

Las puertas del hospital de Kabul permanecieron cerradas, pero no por los bombardeos americanos sino por la negativa de los talibanes a garantizar la seguridad del personal extranjero. "El problema —dice Strada— estaba en la amenaza de los combatientes no afganos, de al menos 20 países diferentes, entre ellos la gente de Al Qaeda en la capital, que amenazaron sin ambages con matar a todos los extranjeros y a los infieles, grupos ambos en los que sin duda me incluyo." Antes incluso de que el régimen talibán se desmoronara en noviembre, Strada había viajado a Kabul para los preparativos de la reapertura del hospital.

Uno de los objetivos de Emergency en Afganistán (y en todos los demás países donde tiene hospitales) es dejar sin trabajo a gente como Strada y Rowlands. Strada y sus compañeros enseñan a los médicos locales, al personal sanitario y a los administrativos las destrezas necesarias para hacer funcionar unas instalaciones modernas, y se van. El grupo del hospital y los puestos de primeros auxilios proporcionan empleo a más de 200 afganos. De hecho, algunos de los médicos y enfermeras son kurdos que vinieron a Anabah tras haber sido adiestrados en programas similares en el norte de Irak.

Las reglas de Emergency son estrictas. Los Kalashnikov que portan muchos hombres adultos están prohibidos dentro del hospital. Incluso el difunto comandante Massud dejó su arma a la puerta cuando visitó las nuevas instalaciones (fue uno de los primeros en hacerlo). A las mujeres que trabajan allí no se les permite vestir ese traje que las cubre de pies a cabeza llamado burka, y quienes dispensan la asistencia médica reciben diariamente clases de inglés, medicina e higiene.

El personal de las cocinas y de mantenimiento se recluta frecuentemente entre antiguos pacientes que quedaron gravemente heridos por minas o metralla. "Emplearlos en el hospital es la única manera de asegurar su supervivencia en la sociedad afgana", dice Strada. Contratar empleados locales y utilizar materiales del lugar contribuye a abaratar los costes. "En Afganistán, nos sale todo por menos de un millón de dólares, incluyendo los sueldos del personal extranjero y el abastecimiento de medicinas", señala.

La asistencia médica no puede desligarse de los programas de ayuda social en un país cuya infraestructura se ha derrumbado totalmente tras 22 años de guerra sin tregua. Así que el hospital ha iniciado programas sociales para viudas y familias y ha construido una pequeña planta hidroeléctrica en el valle de Panjshir, que lleva la electricidad a esta zona por primera vez.

El médico de urgencias en tiempo de guerra corre siempre el riesgo de que le abrume el trabajo. En 1996 Strada dirigía el hospital de Emergency en el norte de Irak cuando las tropas de Saddam Hussein atacaron a los kurdos. Dieciocho horas de trabajo diario pudieron más que él. Sufrió un ataque al corazón y hubo de someterse a una desviación coronaria cuádruple en Italia, tras un viaje de 400 kilómetros hasta la frontera turca y ser trasladado en un avión facilitado por el ministerio italiano de Asuntos Exteriores.

Veterano de todos y cada uno de los conflictos de este cambio de siglo, ha empezado a acariciar el sueño de crear un plan de estudios que gire específicamente en torno a la medicina de la guerra. Los estudiantes de medicina de hoy día reciben formación en cirugía de urgencia, pero están poco preparados para actuar con los limitados recursos de los frentes. Es necesario enseñar, por ejemplo, las sutilezas del proceso de selección por el que los médicos escogen a los pacientes que operarán según sus probabilidades de sobrevivir. "En la guerra, no se pueden desperdiciar tres horas operando a alguien con pocas posibilidades de sobrevivir, cuando al mismo tiempo otros con más probabilidades de salir adelante se están muriendo", dice Strada. Cree que antes de embarcarse en una labor de ayuda, el personal sanitario debería haber sido adiestrado en un amplio abanico de conocimientos prácticos, sin olvidar el de cómo se dirige la construcción física de una nueva clínica. "Deberíamos enseñar cirugía de guerra, pero también logística, comunicaciones e informática, la capacidad de trabajar durante largas horas de estrés, el trabajo en equipo, cuestiones de disciplina y de seguridad", aunque lo más importante, señala, es un curso intensivo de sentido común.

Ciencia y sociedad

El genoma humano

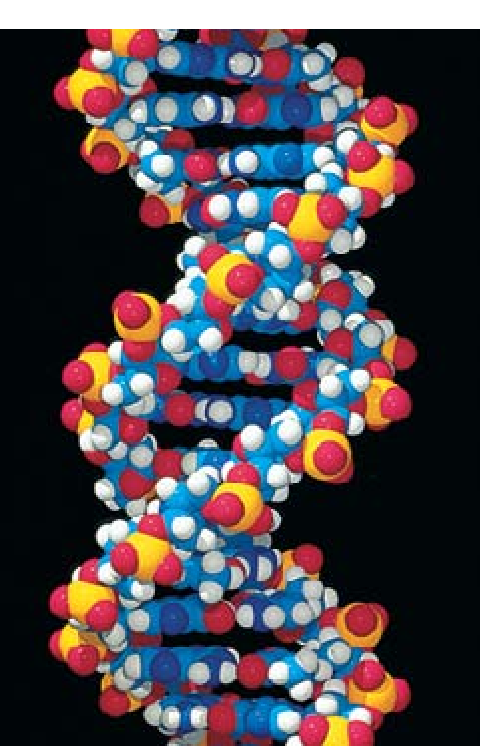
Un año después

En febrero de 2001 se presentó al mundo el primer mapa del genoma humano. Un consorcio público de laboratorios y la compañía privada Celera merecieron la gloria del momento histórico. Transcurrido un año, disponemos de una cierta perspectiva para valorar las repercusiones inmediatas de aquel anuncio. La secuenciación completa del genoma humano ha permitido desvelar la organización de este inmenso alfabeto de letras químicas (las bases nucleotídicas que conforman el ADN), en los fragmentos discretos de información con sentido biológico (los genes). Entonces, los científicos se mostraron un tanto sorprendidos sobre el significado del mensaje encerrado en el libro de la vida, cuya lectura parece abrir más interrogantes que problemas resuelve.

Un primer contratiempo procede del número relativamente bajo de genes que conforman nuestra identidad como especie. Se maneja la cifra de 31.000 genes en total, frente a las previsiones iniciales que estimaban un abanico de entre 80.000 a 100.000 genes. En términos comparativos, el contenido de ADN del hombre apenas duplica el de algunos invertebrados inferiores y sólo contiene unos 300 genes más que el del ratón. Es desconcertante cómo a partir de esta —aparentemente escasa— información codificada, se elaboran a lo largo del desarrollo embrionario estructuras tan complejas como el cerebro.

Una segunda sorpresa la constituye el hecho de que un elevado porcentaje (en torno al 90 %) de nuestros genes sea —al menos en principio— inservible ("basura" en el argot) y no codifica información biológicamente útil, o por lo menos con una función obvia. Si, como sostiene Dobzhansky, "nada se entiende, si no es a la luz de la evolución", parece un contrasentido que hayan podido perdurar, a lo largo de millones de años, especies que conservan tal proporción de basura hereditaria. La selección natural escoge en cada momento los individuos más aptos para sobrevivir en un ambiente determinado. Por tanto, resulta paradójico que la especie teóricamente más evolucionada haya arrastrado tamaña proporción de ADN residual, quizá proveniente de antiguos experimentos evolutivos fracasados o de intercambios genéticos con otros organismos.

Por otra parte, el análisis de la homología de secuencias demuestra que algunos de nuestros genes proceden de virus y bacterias, dato que proporciona un apoyo irrefutable a la teoría de la endosimbiosis. Dicha teoría establece que varios orgánulos esenciales de nuestras células, como las mitocondrias y los cloroplastos, están filogenéticamente emparentados con ciertas bacterias, que se integraron en la célula eucariota durante la evolución.



La doble hélice de ADN, el soporte físico donde reside la secuencia completa de nucleótidos que constituye el genoma humano

A su vez, las diferencias entre individuos de la misma especie son debidas a cambios de una sola base, más que a grandes inserciones y deleciones de material genético. Por tanto, se descarta que la distinción de razas o la discriminación por cualquier motivo tenga un sustrato genético.

Una de las aplicaciones potenciales más inmediatas del "libro de instrucciones de la vida" es la de diagnosticar determinadas patologías y tratar alteraciones genéticas, por el momento inaccesibles. Basado en el conocimiento de cada genoma individual, será factible en breve plazo diseñar tratamientos personalizados, incluyendo la aplicación controlada de fármacos y dosis, evitando así los efectos secundarios y las frecuentes alergias.

Importa, además, la fijación de los criterios para tener acceso a la información del genoma. Es un secreto a voces, las profundas divergencias existentes entre el consorcio público y la compañía privada respecto de la metodología de secuenciación empleada. A expensas de futuras negociaciones, la confrontación actual refleja las mínimas posibilidades de que se alcance un acuerdo razonable entre los dos grandes emporios de la clonación genómica. En principio, parece improbable que las secuencias de genes puedan ser objeto de patente, dada su libre disponibilidad en Internet. Sin embargo, se antoja harto difícil que Celera renuncie a rentabilizar sus costosas inversiones a través del desarrollo de nuevas herramientas de análisis genético y sus aplicaciones.

¿Cuáles son los próximos desafíos? Ya ha comenzado el "proyecto Proteoma", proyectado para traducir en términos de interacciones moleculares la informa-

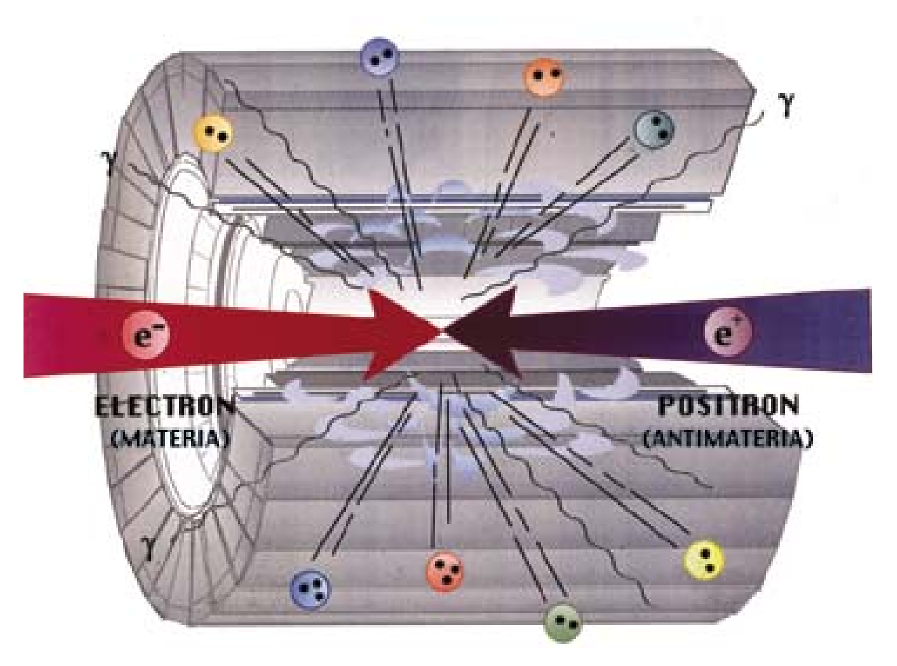
ción disponible. El desciframiento del genoma humano no es el final de trayecto, sino el comienzo de nuevas investigaciones que revelarán aspectos insospechados de nuestra identidad biológica. Es evidente que la configuración única del ser humano como especie biológica reside en sus genes, pero también lo es que el reducido número de genes ahora identificado no basta para explicar nuestra complejidad singular.

Por último, mencionemos, siquiera de soslayo, la insignificante contribución española a la descodificación del genoma humano y —lo que aún resulta más preocupante— la alarmante pasividad de nuestras autoridades en la toma de decisiones, mientras otros países europeos se apresuraron a declarar su implicación directa en el futuro desarrollo de los trabajos. Estamos ante la oportunidad histórica de integrarnos en una revolución que marcará el porvenir de la humanidad en este siglo. El tiempo apremia.

JUAN CARLOS ARGÜELLES
Area de Microbiología
Facultad de Biología
Universidad de Murcia

Cosmología

Un universo de antimateria



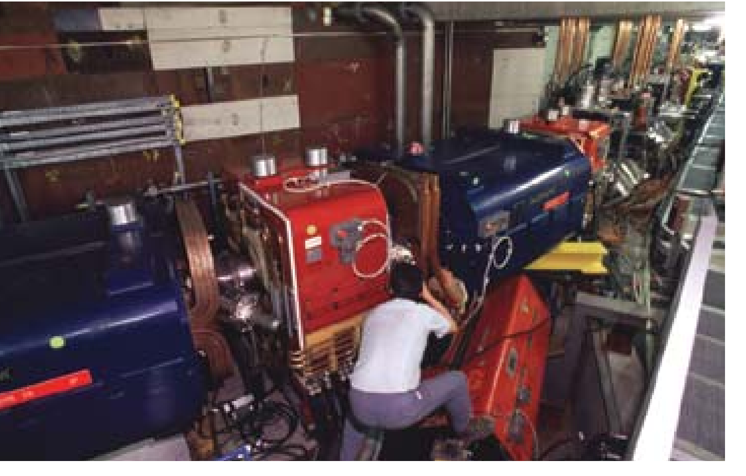
1. La aniquilación de un haz de electrones (e^-) con un haz de positrones (e^+) a altas energías nos permite crear en el laboratorio partículas y antipartículas más pesadas (©CERN)

Los átomos que constituyen la materia son nubes de electrones, con carga eléctrica negativa, alrededor de un núcleo con una carga eléctrica igual pero positiva. La interacción electromagnética entre los electrones y el núcleo es responsable de la estructura atómica y, por tanto, de todas las propiedades químicas, biológicas, etc., del mundo macroscópico que nos rodea. El núcleo atómico está formado por protones y neutrones. Se hallan éstos, a su vez, compuestos por unas entidades más simples, los quarks arriba —"u" (up)— y abajo —"d" (down)—. Dos quarks "u" y un quark "d" forman un protón, mientras que el neutrón tiene una composición "udd". Los quarks están unidos por una interacción muy intensa, la fuerza fuerte o nuclear. Así pues, toda la materia ordinaria está constituida a partir de tres partículas elementales: el electrón y los quarks "u" y "d".

En 1928 el físico inglés P. A. M. Dirac demostró que la combinación de los principios de la mecánica cuántica con la relatividad implica necesariamente la existencia de antimateria. Toda partícula elemental tiene su correspondiente antipartícula con propiedades idénticas (misma masa y tipo de interacción), pero con cargas opuestas. Cuatro años más tarde se descubría el positrón (antielectrón) en los rayos cósmicos que llegan a la Tierra. La observación del antiprotón y del antineutrón (compuestos de antiquarks) no fue posible hasta los años cincuenta, cuando los primeros aceleradores de partículas permitieron su fabricación.

La famosa relación $E = mc^2$ de la teoría de la relatividad nos dice que la masa es una forma más de energía. Si juntamos un electrón y un positrón se aniquilan inmediatamente, transformando su masa en cuantos de energía llamados fotones (γ), que son las unidades básicas de transmisión de la interacción electromagnética. Los fotones forman la luz, las ondas de radio y televisión, los rayos X, etc. El proceso inverso también es posible: a partir de energía pura (fotones) podemos crear pares partícula-antipartícula. Haciendo colisionar haces de partículas y antipartículas a altas energías, hemos descubierto la existencia de partículas más pesadas [los leptones μ y τ y los quarks "extraño" (s), "encanto" (c), "belleza" (b) y "verdad" (t)], que son inestables y se desintegran en electrones y quarks ligeros. Estas desintegraciones se deben a una tercera interacción de muy baja intensidad, denominada fuerza débil.

La interacción débil es capaz de transmutar un quark u en un quark d, transformando así un protón del núcleo atómico en un neutrón. En este proceso se emite un positrón (y un neutrino), que constituye la radiación β^+ generada espontáneamente por algunos núcleos. El positrón emitido se aniquila con un electrón de la materia circundante, produciendo dos fotones que salen en direcciones opuestas con una energía equivalente a la masa del electrón. La detección de estos fotones tiene una importante aplicación en la identificación de tejidos cancerosos mediante la técnica de tomografía por emisión de positrones. Administrando al paciente glucosa marcada con una pequeñísima cantidad de isótopos ra-



2. Los antiprotones producidos en colisiones de alta energía tienen velocidades muy cercanas a la de la luz. El nuevo "Decelerador de Antiprotones" del CERN los frena, hasta alcanzar velocidades diez veces más pequeñas, para enviarlos posteriormente a trampas magnéticas donde, tras ser frenados nuevamente, se combinarán con positrones y formarán antiátomos (©CERN)

diactivos β^+, podemos visualizar fácilmente la distribución de glucosa en el organismo. Como las células cancerígenas tienen un consumo energético más alto, se caracterizan por una mayor concentración de glucosa.

Las interacciones electromagnética y fuerte de las antipartículas son idénticas a las de las correspondientes partículas. Por tanto, pueden formar antiátomos y antinúcleos, totalmente análogos a los átomos y núcleos de la materia ordinaria. La producción y estudio de antimateria se ve dificultada por su inmediata aniquilación con la materia del laboratorio. Utilizando ingeniosas trampas magnéticas, se ha conseguido atrapar positrones y antiprotones de muy baja energía en pequeños espacios (en los que previamente se ha hecho el vacío), donde pueden encontrarse y formar átomos de antihidrógeno. En el Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) se están realizando varios experimentos de este tipo para estudiar la estructura atómica de los antiátomos más simples.

Es sorprendente la ausencia de antimateria en el universo. Si las leyes de la física son idénticas para partículas y antipartículas, sería más lógico un universo simétrico con cantidades iguales de materia y antimateria. Afortunadamente nuestro mundo no es así, pues la aniquilación entre partículas y antipartículas generaría un universo de energía pura donde la vida no sería posible. Podemos especular sobre la posible existencia de otros universos: burbujas de materia o de antimateria, separadas por grandes distancias comparables al tamaño del universo conocido. Más probable parece la formación de una pequeña asimetría entre materia y antimateria al principio del universo, en los primeros 10^{-10} segundos después de la gran explosión. Tras la consiguiente aniquilación, el pequeño exceso de materia habría producido el universo que conocemos.

Pero, ¿cuál fue la causa de esa asimetría? Aunque no tenemos una explicación convincente, hemos observado pequeñas diferencias entre la interacción débil de los quarks y la de los antiquarks, que podrían aportar alguna respuesta. Las desintegraciones débiles del quark *s* y de su antiquark son objeto de investigación en el CERN, Fermilab (EE.UU.) y Frascati (Italia). En California y Japón están funcionando dos intensos colisionadores de electrones y positrones, con la energía apropiada para producir pares quark-antiquark de tipo *b*. Esperamos que estos experimentos nos muestren las diferencias entre materia y antimateria y nos permitan, quizá, una mejor comprensión del universo en que vivimos.

ANTONIO PICH
Instituto de Física Corpuscular,
Universidad de Valencia, CSIC

Ritmos circadianos

El reloj de Arabidopsis thaliana

Un fenómeno común en la naturaleza es la fluctuación periódica de importantes actividades biológicas. Procesos tan distintos como la eclosión de los insectos, la fotosíntesis de las plantas y los ciclos de sueño/vigilia de los humanos oscilan con una periodicidad de 24 horas. Estos ritmos biológicos denominados circadianos representan una adaptación de la naturaleza a la rotación de 24 horas de la Tierra y a los cambios diarios de luz y temperatura que ese giro conlleva.

Los mecanismos moleculares del reloj circadiano vienen fascinando desde hace algo más de tres siglos, cuando se observó el movimiento rítmico diario de las hojas de plantas, abiertas durante el día y plegadas en ángulo más cerrado por la noche. Sometidas a una oscuridad permanente, estos movimientos continúan como si las plantas todavía estuvieran expuestas a ciclos de luz y oscuridad.

La percepción de que el período del movimiento rítmico de las hojas en condiciones constantes, es decir, en ausencia de señales ambientales externas, no sea exactamente 24 horas, indujo a pensar que los ritmos circadianos se hallaban controlados por un oscilador bioquímico endógeno, no por ciclos del medio exterior.

Sabemos ahora que los ciclos diarios de luz y temperatura son los encargados de sincronizar el reloj para que funcione con la periodicidad exacta de 24 horas que observamos en la naturaleza, haciendo así coincidir el tiempo biológico interno con el tiempo solar.

El modelo conceptual básico del reloj biológico consta de tres componentes principales: ruta de entrada, oscilador central y ruta de salida (*véase la figura*). La ruta de entrada está representada por las señales externas, luz y temperatura, que promueven una serie de reacciones en cascada cuya finalidad es transmitir la información ambiental al oscilador central, auténtico marcapasos responsable de generar el ritmo circadiano. De acuerdo con los modelos propuestos en procariotas y células animales, el oscilador central parece estar regulado por mecanismos de retroalimentación negativa. Las rutas de salida proporcionan la conexión entre el oscilador y los procesos biológicos con ritmos circadianos controlados por el reloj.

En los últimos años se ha puesto particular empeño en dilucidar las bases moleculares del oscilador central de *Arabidopsis*. Los componentes del oscilador deben cumplir ciertos requisitos básicos para generar ritmicidad. Hasta ahora se conocen tres posibles candidatos, las proteínas LHY, CCA1 y TOC1, que satisfacen algunos de tales requisitos. Por ejemplo, LHY, CCA1 y TOC1 oscilan con una periodicidad circadiana, controlan sus niveles de expresión mediante autorrepresión de su síntesis y, cuando se mantienen sus niveles de expresión constantes, pueden parar el reloj y, consecuentemente, la ritmicidad.

Ocurre, sin embargo, que las mutaciones inducidas en los genes que codifican dichas proteínas no provocan una expresión arrítmica de genes controlados por el reloj. Ello resta fuerza a la consideración de LHY, CCA1 y TOC1 como únicos componentes del oscilador. Cabe, pues, la posibilidad de que LHY, CCA1 y TOC1 sean funcionalmente redundantes, que haya otros componentes del oscilador todavía sin identificar o que sucedan ambas cosas.

Aunque el genoma de *Arabidopsis* contiene varios genes que determinan proteínas homólogas con CCA1 y LHY, se requieren experimentos adicionales que resuelvan sin ambigüedad que LHY, CCA1 y TOC1 forman parte del oscilador central de *Arabidopsis*.

La luz constituye la principal señal externa en el control de los procesos fisiológicos y de desarrollo de la planta. La regulación de estas respuestas fisiológicas reside principalmente en los fitocromos y criptocromos, fotorreceptores que absorben luz roja y azul respectivamente.

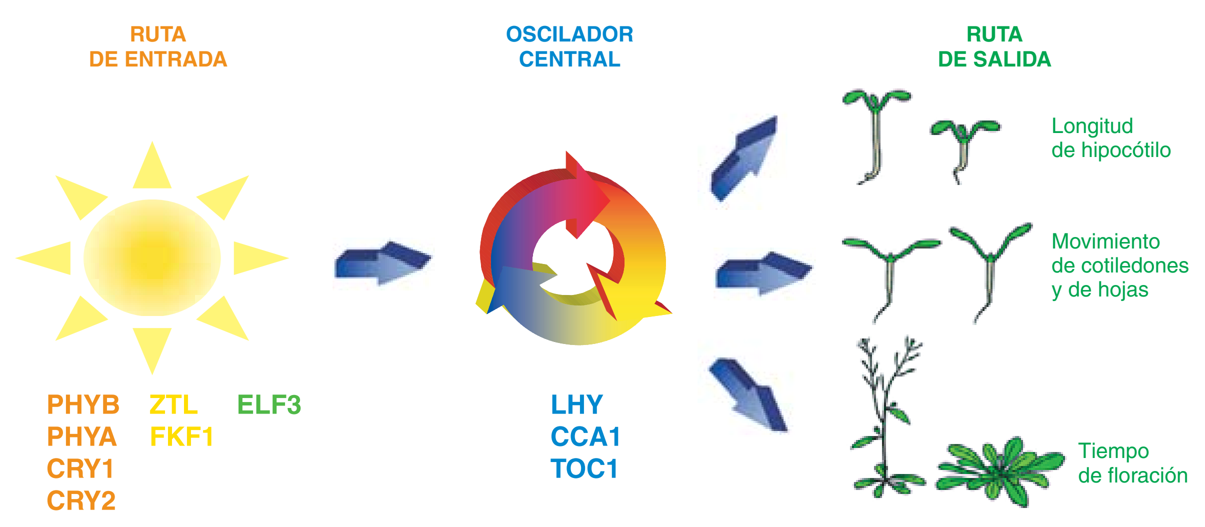
Con relación al reloj, sabemos que, para generar ritmos de 24 horas, el oscilador central debe sincronizarse diariamente con los ciclos de luz y temperatura. Los recientes trabajos realizados en el laboratorio de Steve A. Kay han demostrado que los fitocromos A y B, con los criptocromos 1 y 2, forman parte de la ruta de entrada del reloj e intervienen en su sincronización.

Ahora bien, las plantas mutantes, deficientes en fitocromos A y B y criptocromos 1 y 2, siguen manteniendo la ritmicidad. Por tanto, en la transmisión de luz al reloj tienen que haber implicados otros fotorreceptores. De ahí el interés de la clonación de los genes *ZTL* y *FKF1* de *Arabidopsis* que acaba de conseguirse. Esos genes determinan nuevas proteínas que parecen desempeñar un papel importante en el control de las señales luminosas en la ruta de entrada del reloj.

Los análisis genéticos de *Arabidopsis* han puesto también de manifiesto otras proteínas que participan en la transducción de la señal luminosa hacia el oscilador central. Las mutaciones inducidas en el gen *ELF3* dan por resultado la arritmia en presencia de luz, aunque no en condiciones de oscuridad. De lo que se infiere que la proteína ELF3 podría hallarse implicada en la regulación de la luz que percibe el oscilador. Asimismo, se ha identificado un factor de transcripción, PIF3, que *in vitro* no sólo puede unirse a fitocromos, sino también a un dominio conservado presente en los promotores de CCA1 y LHY.

Todos esos resultados, tomados en conjunto, configuran la primera demostración, en el ámbito molecular, de la interacción entre fitocromos y componentes del oscilador central.

Con respecto a las rutas de salida, se conocen numerosos procesos biológicos que están controlados por el reloj circadiano. En algunos encontramos el movimiento de cloroplastos, el alargamiento de hipocótilos, la apertura de estomas,



Esquema simplificado de los tres componentes básicos del reloj biológico. La ruta de entrada aparece representada por señales ambientales externas (principalmente señales luminosas); promueven una serie de reacciones por las que la información ambiental se transmite al oscilador central. Los fitocromos A y B, los criptocromos 1 y 2, y las proteínas ZTL, FKF1 y ELF3 parecen participar en el control de estas señales luminosas que percibe el reloj. El oscilador central es el responsable de generar el ritmo circadiano; podría estar regulado por mecanismos de retroalimentación negativa. LHY, CCA1 y TOC1 son los posibles componentes del oscilador central de Arabidopsis. *Las rutas de salida proporcionan la conexión entre el oscilador y los procesos biológicos con ritmos circadianos controlados por el reloj. Se ilustran algunos de estos procesos*

el tiempo de floración y el movimiento de cotiledones y de hojas. La expresión de varios genes muestra también ritmicidad circadiana.

Con el advenimiento de nuevas técnicas —microdisposiciones ("microarrays") o chips de ADN— se puede analizar la expresión génica de miles de genes simultáneamente. Aplicadas al estudio de *Arabidopsis*, se ha observado que aproximadamente un 6 % de ARN mensajero oscila con una ritmicidad circadiana. Utilizando estas técnicas se podrán identificar los genes controlados por el reloj para su correlación subsiguiente con las rutas metabólicas y procesos celulares y fisiológicos en los que dichos genes están involucrados.

Con todo, nos hallamos todavía muy lejos de dominar las bases moleculares, bioquímicas y celulares que controlan los ritmos circadianos de las plantas. La elucidación de los mecanismos genéticos y moleculares del reloj biológico de *Arabidopsis* nos ayudará a entender su desarrollo floral, su fotorregulación del crecimiento y su metabolismo. Además, las lecciones extraídas de la investigación en *Arabidopsis* podrán servirnos para descifrar el reloj circadiano de otros organismos.

PALOMA MAS MARTÍNEZ
The Scripps Research Institute,
La Jolla (EE.UU.)

El reloj de los mamíferos

Núcleos supraquiasmáticos

La división del día en 24 intervalos de igual duración, inventada por los babilonios en el segundo milenio antes de Cristo, no se generalizó hasta la Edad Media, cuando se idearon los primeros relojes mecánicos. Pero la naturaleza había afrontado el problema de la cronometría probablemente desde el momento en que los primeros organismos vivos aparecieron en nuestro planeta.

El movimiento de rotación terrestre debió de ejercer una fuerte presión selectiva en favor de mecanismos predictores de la alternancia del día y la noche, pues casi todos, si no todos, los organismos poseen relojes circadianos. Estos relojes biológicos tienen la capacidad de oscilar en forma automantenida con una periodicidad de aproximadamente 24 horas (de ahí el término *circa*-diano) y de imponer dicha periodicidad, generando los ritmos circadianos.

Durante los años setenta y ochenta del siglo XX se demostró que el control maestro de los ritmos circadianos en mamíferos corría a cargo de osciladores ubicados dentro de un par de núcleos bilaterales de la base del hipotálamo, los núcleos supraquiasmáticos (NSQ). La prueba más sólida e inequívoca la aportaron ciertos experimentos realizados en roedores de laboratorio.

La lesión inducida de los NSQ anulaba en esos animales los ritmos conductuales y endocrinos. Al trasplantarles NSQ proveniente de fetos no sólo recuperaban los ritmos comportamentales, sino que lo hacían también con características propias del genoma del donante del tejido y no del receptor.

El protagonismo exclusivo de los NSQ perduró varios años. Y aunque andando el tiempo se demostró la existencia de osciladores circadianos en retina e incluso en tejidos periféricos (hígado, testículo y músculo), el alto grado de localización y especificidad funcionales que los ritmos circadianos encuentran en los NSQ resulta ser casi único del sistema nervioso central. Esta característica del sistema circadiano representa un factor fundamental en el crecimiento exponencial que ha experimentado el conocimiento de las bases celulares y moleculares de los ritmos circadianos en mamíferos.

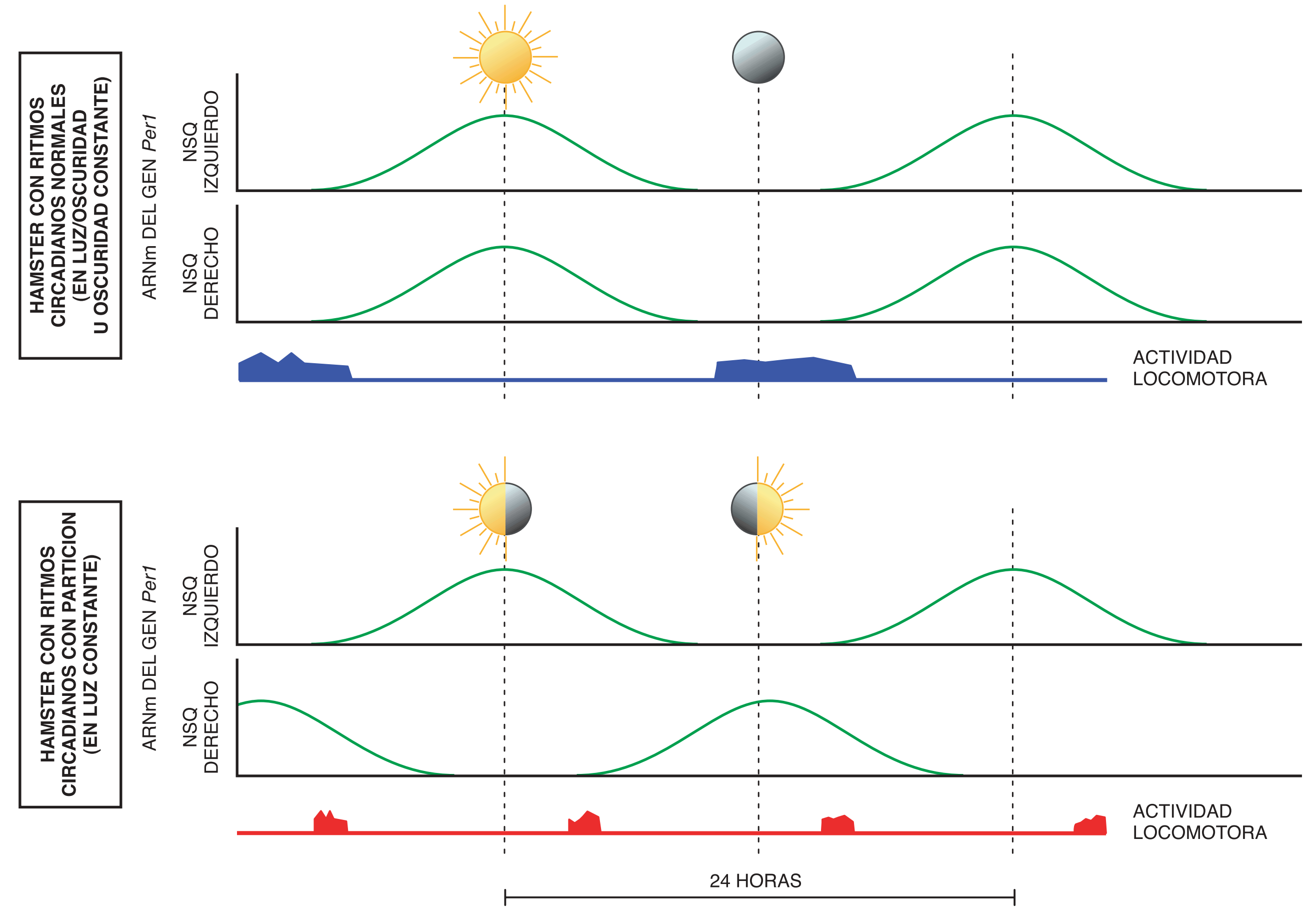
¿Cómo está construido el reloj dentro de los NSQ? Si partimos de la base de que el reloj es neuronal, existen dos alternativas: la primera es que la oscilación de unas 24 horas sea el resultado de una red de neuronas que, consideradas una por una, carezcan de la capacidad de oscilar en forma circadiana; la segunda es que cada neurona del reloj sea, en sí misma, un oscilador circadiano. En otras palabras, el reloj puede ser una propiedad emergente de la red neuronal o una propiedad intracelular.

El grupo encabezado por Steve Reppert, de la Universidad de Harvard, demostró que las células de NSQ disociadas en cultivo revelaban oscilaciones de casi 24 horas en su actividad eléctrica, expresada en la frecuencia de potenciales de acción. El reloj de los NSQ no era uno, sino miles de relojes celulares que interaccionaban para producir una salida (*output*) al resto del organismo.

Del trabajo de Reppert y otros similares se desprendía que el período de los distintos osciladores celulares variaba dentro de un mismo animal. Así, en un cultivo de células provenientes de NSQ de un individuo pueden observarse neuronas con períodos que difieren hasta en 2 horas. En el animal, sin embargo, todos los osciladores deben estar sincronizados para generar un período circadiano único, típico del organismo en cuestión. Se ha demostrado que el período promedio de los osciladores en cultivo corresponde al período circadiano de actividad locomotora del animal, en condiciones constantes de laboratorio.

Si bien se desconoce cómo se sincroniza la población de osciladores, es probable que no sea mediante sinapsis, ya que el bloqueo de los potenciales de acción dentro de los NSQ *in vivo* durante varios días no logra desincronizar a los osciladores. Hasta hace poco se ignoraba el mecanismo desencadenante de las oscilaciones circadianas dentro de cada célula. Pero en los últimos cinco años comenzaron a salir a la luz los engranajes moleculares y sus interacciones en el reloj circadiano de mamíferos.

La caracterización de los primeros mutantes circadianos, varios decenios atrás, supuso un paso decisivo en la demostración de que la generación de los ritmos circadianos tenía bases genéticas. El descubrimiento de los "genes reloj" en la mosca de la fruta llevó a la búsqueda de genes homólogos en roedores de laboratorio; hoy se conoce un grupo importante de estos genes y parte de los mecanismos responsables de la ritmicidad cir-



Modelo esquemático de los osciladores circadianos dentro de los núcleos supraquiasmáticos (NSQ) que generan ritmos circadianos. Cada núcleo, a izquierda y derecha, consta de una población de osciladores circadianos (neuronas). La expresión de los genes reloj dentro de cada neurona (por ejemplo el gen Per1, en verde*) oscila en forma circadiana, de modo que es alta durante el día (NSQ esquematizados como un sol) y baja durante la noche (NSQ esquematizados como una luna). En un hámster en condiciones de luz/oscuridad, o de oscuridad constante, las neuronas de cada núcleo oscilan en sincronía, presentándose actividad locomotora* (barras azules) *cada 24 horas, aproximadamente, cuando la expresión de los genes corresponde a los valores nocturnos. En un hámster en condiciones de luz constante las neuronas de los núcleos izquierdo y derecho continúan oscilando con un período de aproximadamente 24 horas, pero lo hacen en antifase (NSQ esquematizados como medio sol y media luna), de modo que los valores nocturnos de expresión génica y la actividad locomotora* (barras rojas) *se presentan cada 12 horas*

cadiana. Brevemente, los productos proteicos de estos genes son factores de transcripción o bien proteínas que pueden modificar la actividad de factores de transcripción.

La transcripción y la traducción de estos genes se encuentran involucradas en un ciclo de retroalimentación negativa: la proteína inhibe la transcripción de su propio gen. El proceso genera oscilaciones en los niveles de los respectivos ARNm y proteínas, que constituyen la base del mecanismo oscilatorio del reloj.

Mediante el análisis de la expresión de dichos genes reloj en animales intactos hemos demostrado, en nuestro laboratorio, que los osciladores dentro del NSQ pueden agruparse dentro de dos subpoblaciones discretas de osciladores. Tras exponer hámsters a luz constante, se observaba una disociación del ritmo circadiano de actividad locomotora en dos componentes; los animales alcanzaban un pico de actividad aproximadamente cada 12 horas, en vez de cada 24 horas.

Demostramos que cada uno de estos picos de actividad locomotora correspondía a la oscilación en antifase de los osciladores del NSQ a la izquierda y a la derecha del hipotálamo, respectivamente. La "partición" de un núcleo bilateral hipotalámico en dos mitades que procesan distinta información temporal no tiene precedentes. Con ello se ponía de manifiesto la importancia de la interacción y la sincronización entre los osciladores celulares del NSQ en el tejido. La forma en que los osciladores circadianos se agrupen traerá consigo efectos drásticos en la fisiología de un animal, como comportarse según un día de 12 o de 24 horas.

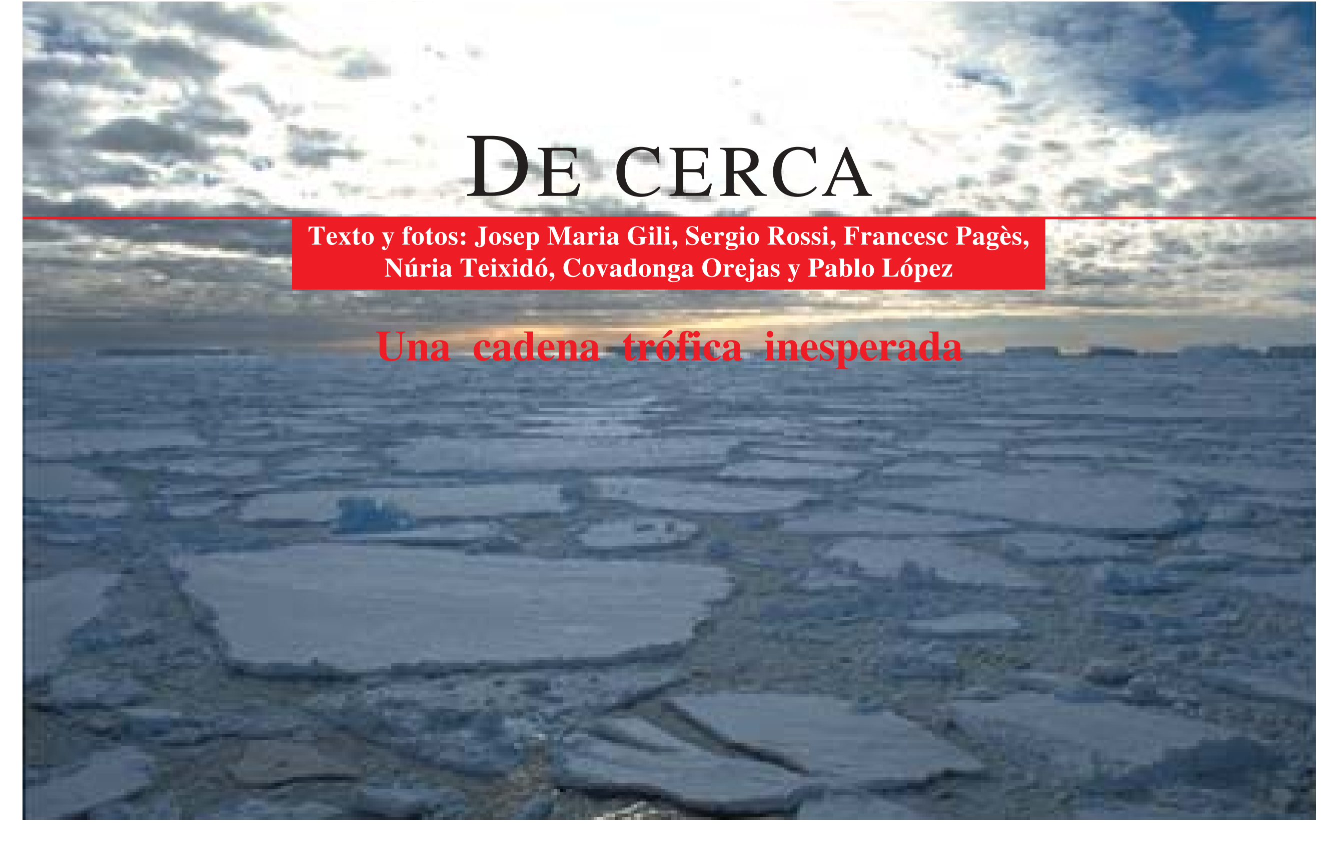
La luz arrojada sobre las bases moleculares y celulares de los ritmos biológicos ayudará a entender, y a su tiempo tratar, enfermedades vinculadas al sistema circadiano. Tenemos un ejemplo claro en la reciente demostración de que un síndrome de avance de fase de sueño que se hereda genéticamente se debe a una mutación en uno de los genes reloj.

Horacio O. de la Iglesia
Dpto. de Neurología
Universidad de Massachusetts

DE CERCA

Texto y fotos: Josep Maria Gili, Sergio Rossi, Francesc Pagès, Núria Teixidó, Covadonga Orejas y Pablo López

Una cadena trófica inesperada



1. En la Antártida, la formación de la placa de hielo significa una época de carestía para la mayoría de los organismos, que centran su producción en los meses de primavera-verano austral

Cuando la banquisa de hielo empieza a retroceder en los mares polares, llega la hora en que se incrementa la producción para todos los organismos de la columna de agua y del fondo. Se trata de un fenómeno recurrente de explosión de vida en la Antártida. Aunque estudiado desde distintos puntos de vista, quedan varias incógnitas por resolver. Copépodos, ballenas, focas y pingüinos se desplazan hacia el exterior de la banquisa cuando ésta se forma de nuevo. Pero, ¿qué ocurre con otros organismos?

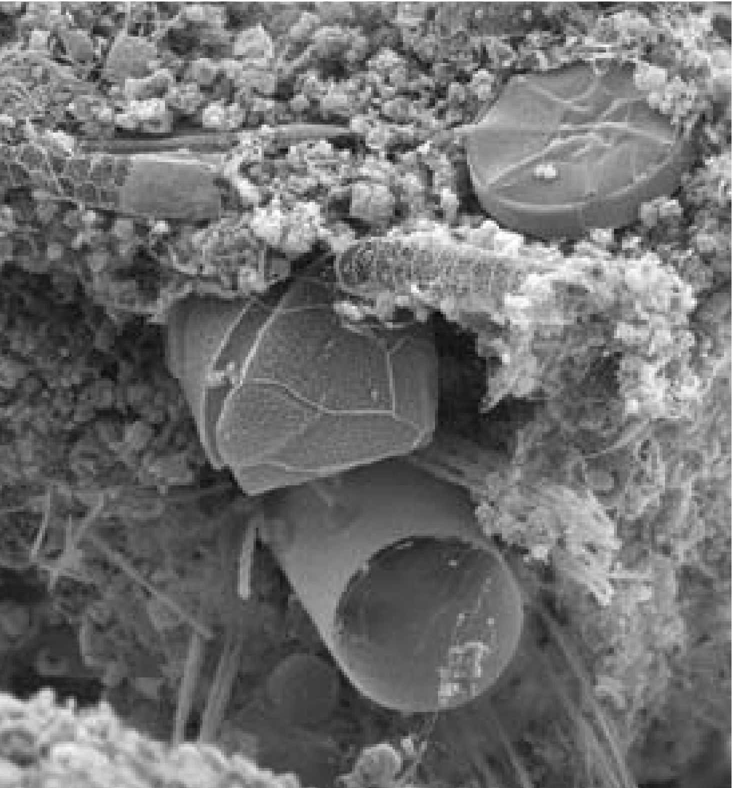
Bajo el hielo persisten muchos seres que se alimentan de algas microscópicas, detritus y microorganismos depositados en el sedimento. Ahora bien, ¿de qué viven los que permanecen en el fondo del mar y no entran en "letargo"? Algunos animales permanecen inactivos durante un período de tiempo, a veces muy breve, hasta la siguiente estación favorable. Otros, se acaba de descubrir, aprovechan fuentes de energía un tanto singulares.

En recientes expediciones antárticos se ha observado la depredación, por parte de un cnidario (*Anthomastus bathyproctus*), del que se considera un organismo exclusivamente pelágico: las salpas (*Salpa thompsoni*).

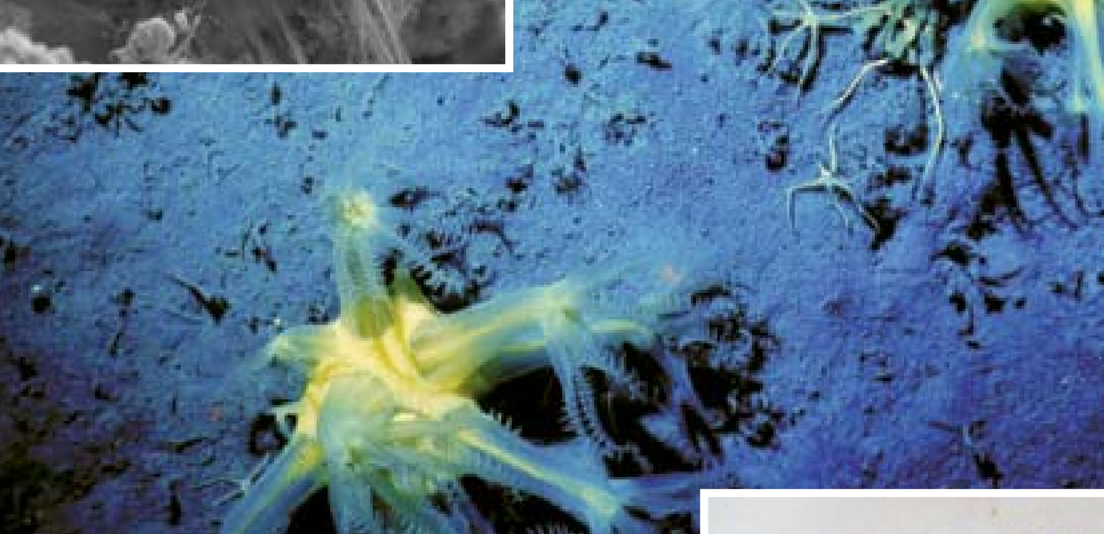
Las salpas, organismos del plancton gelatinoso, desciende en otoño hasta el fondo, buscando material de las floraciones algales de primavera-verano, acumulado en forma de fitodetritus, que las fuertes corrientes adyacentes al sustrato resuspenden. De tales migraciones verticales se aprovecha un depredador singular cuya morfología (corona con grandes pólipos) parece perfectamente adaptada a una paciente espera. Así, se produce una transferencia de energía casi directa desde el plancton algal filtrado o retenido por las salpas de la superficie hacia un organismo bentónico.



2. Las salpas (Salpa thompsoni) *se acercan al fondo, en busca de material resuspendido, muy abundante y rico en determinadas zonas después de la primavera-verano austral*



3. Los contenidos estomacales de la salpa muestran, en esta fotografía de microscopio electrónico de barrido, restos de fitoplancton y otros materiales no identificables, posiblemente filtrados tanto en la superficie como en el fondo de la columna de agua



4. El final de la cadena trófica: el cnidario Anthomastus bathyproctus *(expandido) espera la presa (salpas o krill) provenientes de la migración vertical registrada en la columna de agua*

5. Ejemplar de Anthomastus *con los pólipos llenos de salpas atrapadas en su interior*

El carbunco y su capacidad letal

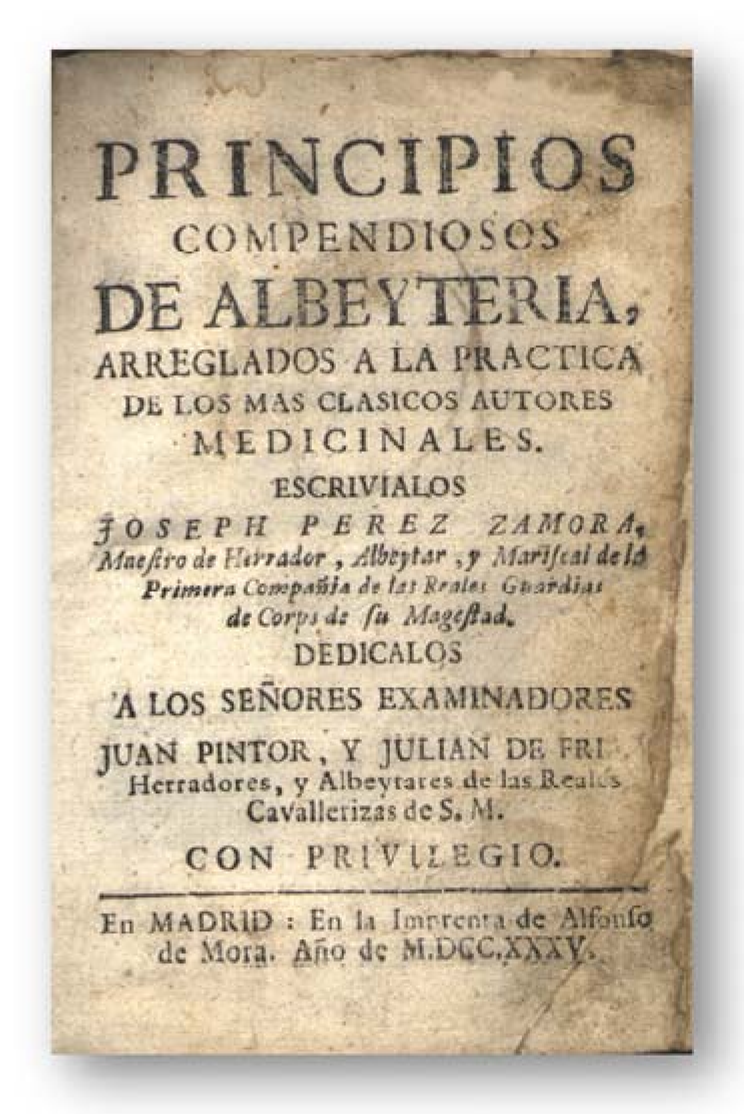
Desde hacía medio siglo la enfermedad carbuncosa había desaparecido. Las esporas infecciosas de esta bacteria, que persisten durante decenas de años, son fáciles de preparar, almacenar y esparcirse mediante aerosoles, cualidades que hacen de ella una eficaz arma biológica

Willy Hansen y Jean Freney

Cuenta la mitología que el centauro Nesos fue asesinado por Heracles al haber intentado forzar a Dejanira, su mujer. En venganza, un Nesos moribundo entregó su túnica manchada de sangre a Dejanira; este talismán debería garantizarle la fidelidad de su esposo. Pero, cuando Heracles se la vistió, experimentó tales dolores, que puso fin a sus días. Desde entonces la leyenda de la túnica de Nesos se asoció al carbunco. La prenda era de lana. ¿Procedía ésta de un animal enfermo de carbunco? Conocido desde la antigüedad, el carbunco fue descrito por Hipócrates en el siglo IV antes de Cristo. La enfermedad no era infrecuente en Roma. Virgilio señaló la transmisión del cordero al hombre. Se menciona asimismo en el Egipto faraónico.

El carbunco, también llamado fiebre carbuncosa, carbunco bacteridiano, fiebre bacteriana o bacteridia carbuncosa, se debe a la bacteria *Bacillus anthracis*. Los médicos árabes designaban a la enfermedad con el nombre de "fuego persa". Se han utilizado otras denominaciones, sobre todo en el caso de los animales: peste roja, peste carbuncosa y, también, peste de Siberia. El término "peste" no guarda relación alguna con la peste originada por *Yersinia pestis*, pero se ha utilizado para evocar los estragos causados por esta enfermedad en el ganado ovino y bovino.

Los veterinarios del siglo XIX designaron el ataque carbuncoso de forma diferente según la especie animal afectada; así, hablaron de la "sangre de bazo" del cordero, de la "fiebre carbuncosa" del caballo y de la "enfermedad de la sangre" de la vaca. Ello se debe al color negro que toman la sangre, el bazo y diversos órganos de los animales afectados, así como las pústulas de los seres humanos atacados por la


PRINCIPIOS
COMPENDIOSOS
DE ALBEYTERIA,
ARREGLADOS A LA PRACTICA
DE LOS MAS CLASICOS AUTORES
MEDICINALES.
ESCRIVIALOS
JOSEPH PEREZ ZAMORA,
Maestro de Herrador, Albeytar, y Mariscal de la
Primera Compañia de las Reales Guardias
de Corps de su Mageſtad.
DEDICALOS
A LOS SEÑORES EXAMINADORES
JUAN PINTOR, Y JULIAN DE FRI
Herradores, y Albeytares de las Reales
Cavallerizas de S. M.
CON PRIVILEGIO.
En MADRID: En la Imprenta de Alfonso
de Mora. Año de M.DCC.XXXV.

enfermedad, que en ellos lleva el nombre de "carbunco".

El carbunco es, sobre todo, una zoonosis. El suelo constituye un reservorio para la bacteria, que persiste en él en forma de esporas, por lo que los animales herbívoros (la vaca, el cordero, la cabra, el caballo y, con menor frecuencia, el cerdo) son los más amenazados por la enfermedad. El hombre puede infectarse de forma accidental si manipula lanas, pieles o cueros que contengan esporas; la inhalación de estas esporas puede ocasionar el carbunco pulmonar. Se conocen otras formas clínicas de carbunco en el hombre: cutáneo, gastrointestinal y meningitis carbuncosa.

El carbunco, excepcional hoy en los países industrializados, es endémico en Europa oriental, la zona mediterránea (Turquía), Africa, sudeste asiático y América del Sur. Se presenta de forma epidémica en Guatemala, Guinea, Mauritania, Nigeria y Vietnam.

Hasta finales del siglo XVIII se consideraban carbuncosas todas las lesiones inflamatorias y gangrenosas de la piel y del tejido celular subcutáneo, por lo que bajo un mismo nombre (el carbunco) se designaban enfermedades diferentes. Añádase a ello la anfibología del término. Para los anglosajones, el carbunco producido por *Bacillus anthracis* se llama en inglés *anthrax*. Pero el ántrax, en español, designa una lesión inflamatoria y supurada de la piel originada por una bacteria diferente, el estafilococo dorado (*Staphylococcus aureus*).

Bacillus anthracis

Bacillus anthracis, el agente del carbunco, alcanza un tamaño considerable; *in vivo*, la bacteria está rodeada de una cápsula que la hace muy resistente. Al contrario que en otras especies del género *Bacillus* (siempre móviles), el *Bacillus anthracis*, desprovisto de cilios, permanece inmóvil.

En las muestras de sangre o de pus, el bacilo carbuncoso se presenta en forma de cadenetas. Cuando la bacteria se siembra en medios de cultivo ricos en constituyentes orgánicos, se estira en largos filamentos más o menos enrollados (las famosas "cañas de bambú"). En medios pobres en elementos nutritivos y en presencia de oxígeno, la bacteria forma esporas ovoideas, capacitadas para sobrevivir en un medio hostil y mantenerse viables durante decenios (hasta sesenta años).

Fisiopatología del carbunco

Por regla general el animal contrae el carbunco a través de una herida en la boca producida al pastar hierba o al comer forraje con esporas de *Bacillus anthracis*. Le sigue una septicemia letal: el animal muere entre las 24 y las 48 horas. En la autopsia se encuentra siempre un bazo muy voluminoso; la sangre es negra, pegajosa, no coagula y contiene numerosos bacilos.

En el hombre, el carbunco se manifiesta bajo tres formas principales: el carbunco cutáneo (95 % de los casos observados), el carbunco pulmonar y el carbunco gastrointestinal. La manifestación clásica del carbunco humano es la pústula maligna. Asienta en el lugar de inoculación del bacilo carbuncoso, que se introduce a través de cualquier rasguño de las manos, brazos o cara.

El primer signo clínico surge tras un período de incubación de dos a tres días. Aparece una pápula similar a la de una picadura de insecto, que da lugar a una vesícula pruriginosa. Tras un ennegrecimiento progresivo de la lesión, se desarrolla una escara negrácea bordeada por un rodete rojizo indurado sobre el que aparecen pequeñas vesículas llenas de un líquido amarillento. En la mayoría de los casos la evolución es favorable, pero en algunas ocasiones la escara progresa y se hace invasiva, apareciendo una lesión edematosa considerable. Si el diagnóstico clínico se establece pronto y se acomete un tratamiento antibiótico precoz, el carbunco cutáneo se controla con rapidez.

de Albeyteria. 175

trario ſerá el daño menos, quanto la parte fuere menos noble.

Como ſe cura el Carbunco?

Supueſtas las evaquaciones neceſſarias, y modo de vida, ſajando profundamente, dexando evaquar quantidad de ſangre por las ſajas, y deſpues ſe lavaràn con Sal, Vinagre, y Ajos machacados, muy caliente, y deſpues cauterizar la parte con Agua Fuerte, ò el cauterio actual, y encima los Polvos de Arſenico, mezclados con Càl Viva, ò los Polvos del Solimàn, para corroher todo lo mortificado, y hazer eſcara fuerte, poniendo encima el emplaſto Cetrino, mezclado con el Baſſalicòn; y ſi la eſcara no ſe redugere, ſe bolverà à hazer eſcarificacion, ſajando, y eſto ſe harà tantas quantas vezes ſea neceſſario, haſta eſtirpàr la raiz. Pondrànſe defenſivos en la circunferencia, daranſe ſus bebidas cordiales para templar el ardor de la ſangre; y en reduciendo la eſcara, ſe curarà la llaga, ò ulcera como las demas.

Què es Vivo, ò Cancer?

Es una llaga melancolica, ancha, redonda, aſpera, y con dureza en los labios,

1. EL CARBUNCO era una vieja enfermedad conocida por nuestros albéitares, como muestran los "remedios" aplicados en España en la primera mitad del siglo XVIII.





2. EN EL LABORATORIO de Louis Pasteur, Émile Roux realizó numerosas observaciones de “bacteridias”, las bacterias de la enfermedad del carbunco: aquí un “cultivo de la bacteridia del carbunco con esporas nacientes” (*a la izquierda*); se aprecian filamentos de la bacteria infecciosa y las esporas que empiezan a formarse. En la “sangre de cobaya muerta de carbunco” (*a la derecha*), se observan igualmente filamentos.

También se observan en el hombre, aunque más raramente, el carbunco pulmonar y el gastrointestinal. El carbunco pulmonar se desarrolla tras la inhalación de “polvo carbuncoso” (esporas de *Bacillus anthracis*), una enfermedad frecuente en trabajadores de la lana; por esta razón se denominó “enfermedad de los cardadores de lana”, “enfermedad de los limpiadores de lana” y “enfermedad de los traperos”. En la actualidad y tras la aplicación de medidas profilácticas en estos oficios, el carbunco pulmonar es una afección rara. La enfermedad se caracteriza por una alteración respiratoria, tos, bronquitis con emisión de expectoraciones viscosas de color pardo y congestión pulmonar. Este cuadro puede complicarse con una meningitis carbuncosa, siendo el pronóstico generalmente mortal.

Por último, el carbunco gastrointestinal se produce por la ingestión de carne contaminada. Excepcional en los países industrializados, aún se observa en Asia y en Africa, a menudo en focos epidémicos. La afección gastrointestinal presenta fiebre, anorexia, náuseas, vómitos, dolores abdominales y diarreas sanguinolentas. Extremadamente grave, el carbunco gastrointestinal puede llevar a la muerte en pocas horas.

Antaño muy extendido por Europa central, Francia y Rusia, el carbunco hizo estragos en el siglo XIV, sobre todo en Gran Bretaña, donde se le denominó la peste negra. Durante los siglos XVII y XVIII originó graves destrozos.

Philibert Chabert (1737-1814), veterinario francés, fue uno de los primeros en estudiar esta “enfermedad enigmática llamada carbunco”, frecuente en las cabañas bovina y ovina. Distinguió el carbunco interno, sin ninguna otra manifestación externa, del carbunco con tumores, asimismo diferenciado del carbunco esencial (sin aparición repentina de tumoraciones) y del carbunco sintomático (con fiebre y aparición secundaria de tumoraciones). De hecho, el “carbunco sintomático” es una gangrena séptica debida a otra bacteria.

La identificación del agente infeccioso

En 1841, cuando una epidemia de carbunco golpeó la cabaña bovina de Beauce, el ministro Cunin-Gridaine encargó el estudio de la enfermedad a Mamert Onésine Delafond (1805-1861). En 1842 Delafond, profesor de la Escuela Veterinaria de Alfort, descubrió corpúsculos en forma de bastoncillos en la

El autor

WILLY HANSEN y JEAN FRENEY son autores de una reciente historia de la bacteriología. Hansen ejerce en el Hospital Clínico Brugmann de Bruselas; Freney enseña microbiología en Lyon.

sangre de animales que padecían la enfermedad. Aunque pensó que había encontrado el agente responsable, acabó dudándolo ante la actitud sarcástica de sus colegas. Y sin embargo...

A mediados del siglo XIX hizo estragos una nueva epidemia de carbunco entre el ganado bovino y ovino en los alrededores de Chartres. El consejo general de Eure-et-Loir hizo llamar a Pierre Francis Olive Rayer (1793-1867), médico de Napoleón III, para que encontrara una solución. Acompañado de su alumno Casimir-Joseph Davaine (1812-1882), Rayer se trasladó al lugar y empezó a trabajar. Demostró que el carbunco es inoculable y que en los animales que morían por la enfermedad "los órganos, los tejidos y la sangre son virulentos". Precisó que la enfermedad se declaraba al finalizar el segundo día (tras la inoculación) con una aceleración del pulso y de la respiración; al tercer día aparecía una fiebre muy alta y al cuarto, tras un breve período de inmovilidad total seguido de movimientos convulsivos, el animal moría. Un examen microscópico de su sangre revelaba "pequeños cuerpos filiformes". Les llamó "bacteridias". No encontró el papel que desempeñaban en la enfermedad.

Rayer y Davaine llegaron a la conclusión de que la sangre de bazo del cordero, la fiebre carbuncosa del caballo, la enfermedad de la sangre de la vaca y la pústula maligna del hombre representan en realidad formas ligeramente diferentes de una misma enfermedad.

En 1841, Christian Joseph Fuchs (1801-1871) observó, en la sangre de una vaca moribunda afectada de la enfermedad, un "gran número de elementos filiformes granulosos, inmóviles", pero los consideró "vibriones muertos". Más adelante, Franz Aloès Antoine Pollender (1800-1879), de la Universidad de Bonn, intentó saber por qué su región presentaba una mortalidad animal tan elevada, sobre todo entre la cabaña bovina. Examinó la sangre de cinco animales moribundos y encontró una cantidad copiosa de "corpúsculos en forma de bastoncillos". Pero no pudo identificar su papel: ¿eran la causa de la enfermedad carbuncosa o una consecuencia de la putrefacción?

En 1850, Davaine halló, con Rayer, "corpúsculos filiformes" en la sangre de animales atacados de carbunco. Interrumpió sus investigaciones hasta que, trece años más tarde, las retomó y conoció los trabajos de Pasteur acerca de la fermentación, fenómeno que este último atribuía a los microorganismos. Culpó de la enfermedad a las bacteridias observadas en la sangre de los corderos con carbunco. Rayer prosiguió sus investigaciones; observó que en la sangre de los animales afectados de carbunco abundaban las bacteridias, lo que no acontecía en los individuos sanos. Confirmó asimismo la transmisión de la enfermedad mediante la inoculación a un animal sano de sangre procedente de otro enfermo y demostró incluso que la inyección de una solución muy diluida de una gota de sangre procedente de un animal enfermo provocaba la muerte del cobaya. Rayer probó que varios compuestos químicos podían neutralizar a las bacteridias.

Otro bacilo de Koch

No aparecía, sin embargo, una explicación convincente acerca de la etiología. En 1870 Baillet, un veterinario francés, advirtió que el suelo y las plantas estaban contaminados con las deyecciones de los animales enfermos y por los cadáveres, razón por la cual las bacterias subsistían en los campos y los prados.

Cuando ese mismo año estalló la guerra franco-prusiana, Robert Koch se alistó en el cuerpo médico militar. Dos años más tarde ocupó la plaza de oficial de sanidad de distrito en Wolheim, una población cercana a Rakwitz. Junto a la sala de consulta instaló un pequeño laboratorio con un jergón, incubadora, microscopio, cámara negra para fotografía, tubos de ensayo y algunos accesorios. Hacia 1873, Robert Koch comenzó sus estudios sobre el carbunco, coincidentes con el brote epidémico desatado en el distrito. Examinó sangre de los corderos muertos por carbunco y confirmó las observaciones realizadas diez años antes por Davaine.

Transmitió el carbunco a un ratón mediante la inyección de una pequeña cantidad de sangre de bazo de un animal muerto; pasó luego la enfermedad de éste a otro, después a un tercero y así hasta veinte, siempre con el mismo resultado: la muerte del ratón



3. PARA CONVENCER a la comunidad científica de la eficacia de la vacuna contra la enfermedad del carbunco, Pasteur, en Pouilly-le-Fort, aceptó vacunar, en público, a corderos después de haberles inoculado, como había hecho con otros corderos no vacunados, el bacilo carbuncoso. Dos días después de la inyección, el público pudo comprobar que sólo habían sobrevivido los corderos vacunados.



4. CUANDO SE ESTABLECIO LA EFICACIA DE LA VACUNA, se comenzó a prepararla en grandes cantidades y a dispensarla en ampollas de cristal.

a los pocos días. Koch fue más lejos. Realizó la esporulación de la bacteria a partir de un fragmento de bazo infectado. Depositó el fragmento en suspensión en una gota de suero de buey colocada sobre un porta y examinó la preparación al microscopio a intervalos regulares; observó bastoncillos que, tras engrosarse, se alargaban en filamentos. Al cabo de un tiempo, los filamentos se convertían en gránulos, que crecían y se transformaban en esporas, refractarias a la luz. Estas primeras observaciones de las esporas del bacilo carbuncoso datan del 12 de abril de 1874.

En el curso de sus investigaciones comprobó también que el aumento de la temperatura de incubación (de 30 a 35 ºC) favorecía el crecimiento bacteriano, al igual que una buena oxigenación. Posteriormente preparó pequeñas "cámaras" de cultivo en forma de pocillos tallados en el porta y que contenían el medio de cultivo; se podían cerrar mediante una pequeña placa de vidrio que las protegía de la desecación y la contaminación. Sus diferentes cultivos le permitieron observar, estudiar y describir el ciclo completo del bacilo carbuncoso. Utilizando la clasificación de Ferdinand Cohn propuso el nombre de *Bacillus anthracis*. Describió las esporas, responsables de la persistencia de la bacteria en el suelo.

Las primeras vacunas

La vacuna, o mejor el prototipo de vacuna, de John Burdon-Sanderson (1828-1905) y William Greenfield (1846-1919) fue probablemente la primera. Se ensayó en Londres en 1878. Burdon-Sanderson y su ayudante observaron que la inoculación de sangre de roedores infectados en bóvidos les provocaba la enfermedad, aunque no resultaba letal. Es más, estos últimos animales resistían posteriormente toda nueva inoculación de "sangre carbuncosa". Observación que confirmaría Greenfield, sucesor de Burdon-Sanderson en el Instituto Brown.

Greenfield modificó la técnica para atenuar la virulencia del bacilo carbuncoso: cultivó la bacteria en tubos de cristal sellados que contenían humor vítreo y los dejó incubar a 35 ºC. Después de tres ciclos de incubación, inoculó una pequeña cantidad de esta suspensión en un ternero, que contrajo una forma grave de carbunco, pero se restableció por completo a los diez días. Algunas semanas más tarde, le inoculó al ternero un triturado de bazo de una cobaya muerta de una infección carbuncosa; la enfermedad apareció bajo una forma muy atenuada y el bóvido se restableció a los dos días. Las inoculaciones repetidas de materia patológica no le causaron ningún efecto. Cada etapa de cultivo atenuaba la virulencia del bacilo carbuncoso hasta el punto de que, tras múltiples reinoculaciones, la cepa perdió su virulencia, aunque conservaba su poder de inmunización. En 1880, Greenfield comunicó sus observaciones en tres publicaciones que precedieron en sólo meses a las de Henry Toussaint (1847-1890).

Nombrado a comienzos de 1871 jefe del servicio de anatomía y fisiología de la Escuela Veterinaria de Lyon, Toussaint había presentado ya dos tesis sobre la enfermedad carbuncosa. En 1878, el Ministerio de Agricultura y Comercio le encargó el estudio del carbunco. Abordó el problema de la inmunización mediante la práctica de "inoculaciones preventivas" en los animales y la búsqueda de una vacuna. Inspirado por las observaciones de Davaine, Toussaint ideó varios métodos para obtener la vacuna: extraía sangre de un animal carbuncoso poco antes de su muerte o inmediatamente después, la filtraba y la calentaba a 55 ºC durante diez minutos, o bien añadía antisépticos. Comprobó que la vacuna era eficaz doce días después de la inyección. Los procedimientos, los resultados y las perspectivas de una inmunidad frente al carbunco se depositaron en la Academia de Medicina el 12 de julio de 1880 en forma de una "plica cerrada". El 6 de agosto de 1880, utilizó con éxito los "líquidos inmunizadores" en seis ovejas. Los animales experimentales adquirieron una inmunidad total.

El triunfo (indebido) de Pasteur

Ni a Greenfield ni a Toussaint se les reconoció su mérito. La gloria iba a llevársela Louis Pasteur (1822-1895). En 1854, Pasteur fue nombrado profesor de química y decano de la facultad de ciencias de Lille, ciudad donde comenzó sus estudios sobre la fermentación. Descubrió que las fermentacio-

nes se deben a microorganismos y que el calor los mata. Era el nacimiento de la microbiología. En 1863 fue nombrado profesor de física y química de la Escuela de Bellas Artes de París. Cinco años después abrió un laboratorio de investigación. Junto con Émile Roux, demostró el papel patógeno del estafilococo dorado en la formación del pus de los forúnculos y realizó estudios sobre el "cólera de las gallinas". Fabricó la primera vacuna antirrábica. En 1877, el ministro de Agricultura le solicitó que encontrara un remedio para el carbunco, que diezmaba los rebaños de corderos y de ganado bovino del departamento de Eure-et-Loir.

Hacía ya más de un año que Toussaint había obtenido sus resultados cuando Pasteur publicó, en 1881, su procedimiento para vacunar contra el carbunco. El 2 de abril, por iniciativa de Hippolyte Rossignol, veterinario de Melun y secretario general de la Sociedad de Agricultura de esta población, se mandó una carta a Pasteur en la que se le pedía que hiciera una demostración de la eficacia de su vacuna anticarbuncosa y confirmara los experimentos anteriores, cuyos resultados había expuesto en una sesión pública en la Academia de Ciencias en marzo de 1881. Pasteur aceptó.

Vacunación en público

La organización del proyecto y la publicidad del acontecimiento quedaron en manos de Rossignol, refractario, por otro lado, a las tesis de Pasteur, de cuyo universo microbiano discrepaba. Se prepararon cincuenta corderos: 25 serían vacunados y otros 25, no. El protocolo preveía que al cabo de 12 a 15 días, todos los animales fueran inoculados con una cepa virulenta del bacilo carbuncoso. El 5 de mayo de 1881, ante una gran multitud, se llevaron a cabo las vacunaciones.

El 31 de mayo de 1881, todos los animales, los vacunados y los no vacunados, fueron inoculados con una suspensión de una cepa bacteriana de carbunco muy virulenta. Se citó a los "espectadores" para dos días más tarde. El 2 de junio de 1881 el público pudo comprobar que todo se había desarrollado según lo previsto: sólo habían sobrevivido a la inyección mortal los animales vacunados. El éxito fue absoluto. El veterinario melunés también se convenció.

Pasteur recibió honores oficiales por esta demostración y fue elegido miembro de la Academia Francesa. ¡Sin embargo, la vacuna utilizada en Pouilly-le-Fort no fue preparada por Pasteur, sino por Roux y Chamberland, según el método de Toussaint, es decir, una suspensión de bacterias de virulencia atenuada y desprovista de esporas, obtenida después de un tratamiento con bicromato potásico!

Sabemos hoy que la vacunación es la única profilaxis eficaz frente al carbunco. Se dispone de dos vacunas: una vacuna viva que contiene una cepa atenuada, comparable a las vacunas fabricadas por Toussaint y Pasteur, y una vacuna acelular, desprovista de cuerpos de bacterias y que contiene sólo antígenos bacterianos.

La vacuna viva presenta el riesgo de que la cepa bacteriana, atenuada, se convierta en virulenta. Además, se acompaña a veces de fiebre, edema, extrema debilidad y otros efectos secundarios. Su inmunidad es de corta duración (un año), por lo que en zonas endémicas es necesario revacunar regularmente. La segunda vacuna es la única autorizada para su uso en el hombre. Los ensayos realizados con esta vacuna en animales muestran una menor eficacia que la vacuna viva atenuada.

Carbunco emergente

Pese a los esfuerzos empeñados para evitar su propagación mediante la vacunación preventiva, asistimos a la reaparición anacrónica de la enfermedad. El 10 de agosto de 2000, el Ministerio de Sanidad de Rumania informaba de la muerte de dos personas por carbunco, tras una epidemia que se había propagado en la cabaña bovina. Indicaba, asimismo, que se habían infectado 21 personas y que otras 24 estaban pendientes de la confirmación del diagnóstico. La primera víctima fue un vaquerillo.

Con la carne de la primera vaca afectada se alimentó a algunos cerdos de la granja. Murieron todos. Una semana más tarde, murieron otras cinco vacas. Poco tiempo después, dos granjeros adultos presentaron asimismo signos clínicos evidentes de una afección carbuncosa cutánea; fallecieron tras una meningitis hemorrágica.

Esta epidemia ha sido la más importante de las registradas en Rumania en los últimos veinte años. Se llevó a cabo una extensa campaña de vacunación animal por todo el país y se tomaron medidas draconianas de prevención. Las personas que habían estado en contacto con los animales enfermos recibieron un tratamiento profiláctico.

Primeros ensayos, grandeza de la naturaleza

La utilización de bacterias, o de sus toxinas, y de virus en la fabricación de armas biológicas data del período de entreguerras, a pesar de la convención de Ginebra de 1925. Esta convención, nacida del rechazo y del horror frente a las armas químicas utilizadas durante la Primera Guerra Mundial, prohibía las armas químicas y bacteriológicas. Sin embargo, la Unión Soviética y los Estados Unidos habían formulado reservas y se atribuían el derecho de utilizarlas en caso de agresión.

Las investigaciones en el terreno de la guerra biológica comenzaron en 1929, cuando la Unión Soviética inició su programa de bacterias militarizables, entre las que se encontraban *Yersinia pestis* (el agente de la peste), *Vibrio cholerae* (el responsable del cólera), *Salmonella typhi* (el agente de la fiebre tifoidea) y *Bacillus anthracis*. En 1934, Japón siguió el ejemplo de la URSS; Inglaterra se apuntó en 1939. Durante el invierno de 1942, científicos del Ministerio de Defensa británico realizaron numerosos viajes a Gruinard, una isla deshabitada de un kilóme-

tro de ancho por tres de largo, en el archipiélago de las Hébridas. Hicieron explotar seis bombas pequeñas que contenían millares de esporas de *Bacillus anthracis*; los experimentos preliminares mostraron que estas esporas resistían la explosión de una bomba clásica y formaban a continuación un aerosol estable. Estas pequeñas bombas se instalaron en una torre al pie de la cual pastaban los corderos, atados cada uno de ellos a una estaca y dispuestos en círculos concéntricos. Otros proyectiles explotaron cerca de la torre.

Unos días después de haber sido expuestos a las esporas de *Bacillus anthracis*, los corderos de Gruinard murieron. Los animales fallecidos liberaron en el suelo una cantidad impresionante de bacterias y de esporas. El suelo permaneció contaminado durante más de cuarenta años: los terrones de muestra extraídos cada año evidenciaban la presencia de esporas viables de *Bacillus anthracis*. Una investigación realizada en 1979 mostraba que las zonas situadas alrededor de la torre central de dispersión aún estaban infectadas y que una gran parte de la isla permanecía contaminada por esporas. En los años ochenta, la isla fue descontaminada. La utilización de cuatro líquidos bactericidas diferentes mostró la gran eficacia del formol, que desnaturaliza las proteínas y penetra en las esporas.

Tras cortar y quemar la vegetación y después de recoger los herbicidas, se regó el suelo con una solución de formol diluido en agua de mar. Los controles bacteriológicos efectuados a continuación demostraron que la mayoría de las esporas estaban inactivas; los lugares en los que se detectaron esporas aún viables se trataron de nuevo hasta que desaparecieron. La descontaminación final necesitó seis semanas de trabajo, 280 toneladas de formol y dos millones de litros de agua de mar. Ocho meses después de la descontaminación, la vegetación apareció de nuevo y se introdujo en la isla un rebaño de cuarenta corderos. Al cabo de cinco meses se mantenían sanos; *Bacillus anthracis* había desaparecido.

Las armas biológicas

Japón se ha distinguido en la puesta a punto de armas biológicas. En 1935 se creó la unidad 731 en Manchuria; la dirigía el general y bacteriólogo Shiro Ishii, quien realizó experimentos bacteriológicos con prisioneros rusos, chinos, estadounidenses, australianos y británicos. Se masacraron más de tres mil cobayas humanos, sometidos a vivisección, congelados hasta morir, infectados mediante diferentes métodos, sobre todo con aerosoles de agentes patógenos entre los cuales figuraba *Bacillus anthracis*. Unos diez mil chinos murieron de carbunco debido a las pruebas realizadas por los japoneses con *Bacillus anthracis* durante los ataques a China y Manchuria.

En el transcurso de la Segunda Guerra Mundial, laboratorios estadounidenses, británicos y canadienses produjeron armas biológicas y sobre todo “bombas con bacilos carbuncosos”, programa que recibió el nombre cifrado “N”. En 1944, miles de bombas con bacilo carbuncoso estaban dispuestas para lanzarse contra la Alemania nazi. ¿No se utilizaron porque la Alemania hitleriana no disponía de armas biológicas? ¿Fue por la persistencia de la contaminación en los terrenos bombardeados? Es posible. Hacia el final de la guerra, se realizaron investigaciones relacionadas con armas biológicas en los alrededores de Poznan, en Polonia; el bacilo del carbunco ocupaba en ellas un lugar privilegiado. La guerra terminó antes de que se consiguieran resultados tangibles.

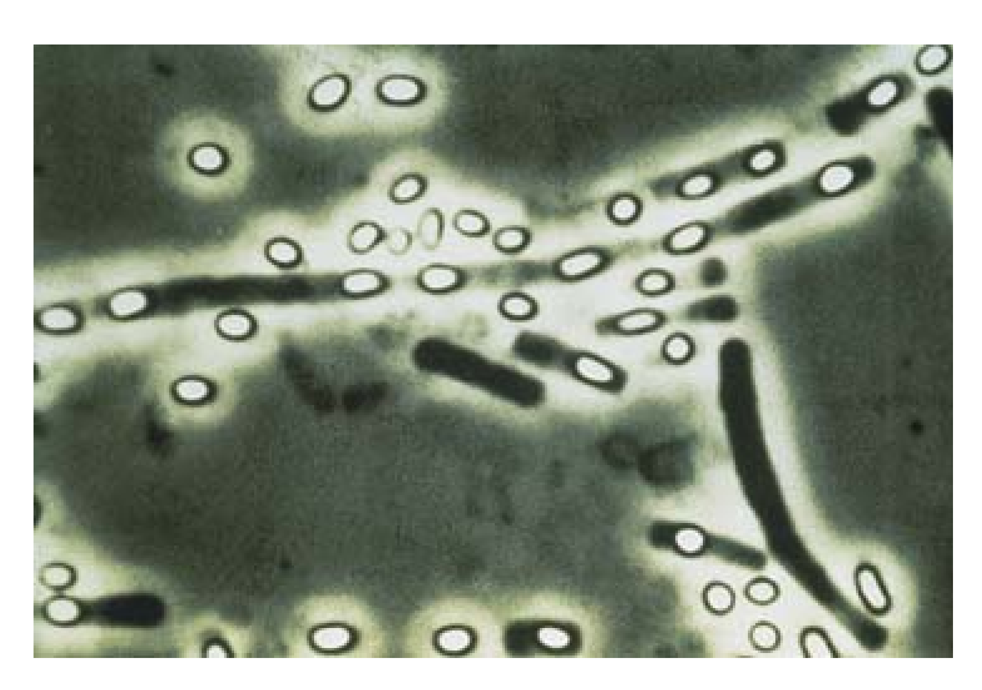
Entre todas las bacterias militarizables, el *Bacillus anthracis* ocupa una posición destacada. En ausencia de inmunidad en la población general, este germen puede llevar a la muerte y presenta además algunas “ventajas”: un umbral infeccioso débil; una virulencia muy intensa que conduce a una enfermedad aguda mortal o al menos incapacitante; un período de incubación corto; un poder patógeno estable durante su fabricación, su almacenamiento y su transporte; una contagiosidad débil; una posible resistencia a los antibióticos habituales; la posibilidad de utilizarse en forma de aerosoles estables y persistentes durante mucho tiempo; capacidad de resistir a la desecación, a las variaciones de temperatura o incluso a la luz cuando se dispersa por el entorno, conservando su viabilidad y su virulencia; por último, unos costes bajos de producción.

La bacteria se cultiva con facilidad al aire libre, en medios simples y de bajo coste. Tiene un gran poder patógeno: un gramo de esporas puede matar a diez millones de personas. Su virulencia es asimismo notable, aunque la enfermedad es poco contagiosa (una ventaja para quienes la manipulan). Aunque la utilización de armas ofensivas bacteriológicas como el *Bacillus anthracis* es poco probable porque son difíciles de controlar, la bomba del bacilo carbuncoso es la “bomba atómica del pobre”. Además, estas armas se detectan con dificultad. El descubrimiento de un vasto arsenal iraquí durante la Guerra del Golfo permitió vislumbrar sus peligros potenciales.

La convención de 1972 sobre armas biológicas y sus toxinas, firmada por 130 países, prohibía el desarrollo, producción, almacenamiento y transporte de agentes biológicos con fines militares. Sin embargo, algunos estados firmantes, como China, Corea del Norte, India, Irán, Libia y Siria, y otros que no habían firmado (Egipto, Israel, Taiwan y algunos otros) continúan sus investigaciones. En 1969, el presidente de los Estados Unidos Richard Nixon consideró poco importante el valor estratégico de las armas biológicas, por lo que los americanos renunciaron a este tipo de armamento, se destruyeron las almacenadas y se cancelaron los encargos para fabricarlas.

Los Estados Unidos, que habían destruido sus reservas en 1969 al concederles poco valor estratégico, retomaron las investigaciones sobre el bacilo carbuncoso cuando se produjo la epidemia de Sverdlovsk, en la Unión Soviética. Durante los meses de abril y mayo de 1979, se declaró una brote fatal en esa ciudad universitaria de 1.200.000 habitantes, si-

5. FILAMENTOS de *Bacillus anthracis* liberando esporas (alrededor de 2500 aumentos).



tuada en los Urales. Las autoridades soviéticas atribuyeron la epidemia al consumo de productos de alimentación contaminados. Pero a escasos kilómetros del lugar había un centro militar de investigación secreto sobre armas bacteriológicas.

Gracias a la clarividencia de una patóloga, Faina Abramova, jefa del servicio de anatomía patológica del Hospital de Sverdlovsk, se llegó pronto a la verdad. Tras seguir los 42 primeros casos declarados desde la primavera de 1972 y haber practicado las primeras autopsias que mostraban hemorragia meníngea, comprendió que semejante cuadro clínico parecía corresponder a un ataque de carbunco. Los cultivos bacteriológicos le permitieron identificar al *Bacillus anthracis*. Las autopsias revelaron que todas estas personas habían muerto de un ataque de carbunco pulmonar por inhalación de esporas. Los datos epidemiológicos demostraron que la mayor parte de las víctimas trabajaban o vivían en una zona próxima al laboratorio militar. Las altas instancias sanitarias soviéticas confiscaron todos los informes.

Sin embargo, se escondieron y conservaron las preparaciones microscópicas, una colección anatomopatológica de lesiones significativas y las notas personales de los patólogos. En 1992, bajo el gobierno de Boris Yeltsin, se reconocieron los hechos y se estableció una conexión entre este desastre y las investigaciones militares en materia de armas biológicas.

Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud, 50 kilogramos de *Bacillus anthracis* lanzados con viento favorable sobre una población de 500.000 habitantes, causarían la muerte de 95.000 personas, mientras que otras 125.000 serían “neutralizadas”.

Las armas biológicas de Irak

A finales de 1970 comenzaron en Irak experimentos para poner a punto armas biológicas. Sus científicos estudiaron cinco cepas bacterianas, una micótica, cinco virus y cuatro toxinas. Dos especies bacterianas no patógenas, *Bacillus subtilis* y *Bacillus thuringiensis*, se utilizaron como cepas de simulación para la puesta a punto sin riesgos de operaciones realizadas posteriormente con material patógeno.

Se retuvieron dos bacterias patógenas: *Bacillus anthracis* y *Clostridium perfringens*, una bacteria responsable de la gangrena gaseosa. Las cepas bacterianas de carbunco se adquirieron en los Estados Unidos y en Francia. Dos cepas iraquíes completaron el muestrario carbuncoso del laboratorio de Al Hakam.

Con la perspectiva de una guerra biológica, los laboratorios iraquíes produjeron, entre 1985 y 1991, ocho mil litros de una suspensión de esporas del bacilo carbuncoso (a una concentración de mil millones de esporas por mililitro); seis mil litros se colocaron en bombas R400 que contenían cada una 85 litros de suspensión, de toxina botulítica y de aflatoxina, una toxina elaborada por un hongo microscópico, tóxico para los riñones y el hígado.

El ejército iraquí desplegó en 1991, durante la Guerra del Golfo, doscientas bombas R400, de las cuales cincuenta se habían cargado con *Bacillus anthracis*, y 25 misiles balísticos SCUD de un alcance de 300 kilómetros, cargados con agentes biológicos. Según Raymond Zilinskas, de la Universidad de Maryland, este arsenal biológico no pudo ser utilizado y, si lo hubiera sido, no habría tenido los efectos anticipados porque la cantidad de bombas y misiles disponibles era escasa y los mecanismos de dispersión de las cargas infectantes, ineficaces. Tras el alto el fuego en abril de 1991 y a pesar de la derrota de los iraquíes, su armamento biológico no parece que fuera destruido. Aunque el programa iraquí de producción de armas biológicas haya sido desmantelado, una parte de sus reservas se ha camuflado sin duda.

Bioterrorismo y bacilo carbuncoso

Desde hace un decenio se asiste a escaramuzas de armas químicas y biológicas. En 1990, la secta Aum dispersó toxina botulínica cerca del parlamento japonés y, meses más tarde, bacilo carbuncoso desde lo alto de un inmueble de Tokio. No hubo víctimas.

En 1995 la misma utilizó gas sarín, produciendo doce víctimas e intoxicando a cinco mil personas.

Según la Organización Mundial de la Salud, las armas biológicas persiguen introducir microorganismos, generalmente expandidos en forma de aerosoles y que provocan enfermedades infecciosas graves. Con este objetivo se han empleado sobre todo bacterias y virus. Entre los agentes biológicos apresados se encuentran, sobre todo, el *Bacillus anthracis*, el bacilo de la peste, el bacilo de la fiebre tifoidea, la bacteria responsable de la fiebre de Malta o brucelosis y también el agente del cólera, enfermedad desaparecida de los países industrializados. Entre los virus "bioterroristas" destacan: el virus de la fiebre coreana (Hantaan), los virus de las fiebres hemorrágicas africanas (los virus Ebola y de Marburgo) o el de Crimea (no resisten temperaturas inferiores a los 34 ºC), el virus de la fiebre del valle del Rift, el del dengue, el de la encefalitis japonesa y también el de la gripe. No figuran en esta lista: el virus de la viruela (desde su erradicación en 1980, sólo dos institutos están autorizados para conservar este virus, el de Atlanta, en los Estados Unidos, y el de Novosibirsk, en Rusia, por lo que no se puede adquirir), los priones, los ácidos nucleicos infecciosos y las toxinas (la botulínica y la enterotoxina B estafilocócica), muy difíciles de manipular y que conllevan grandes riesgos de contaminación.

La adquisición de estas armas biológicas no comporta problemas insuperables para los bioterroristas con dinero. Pueden comprarlas en los países que las producen de forma clandestina: Bulgaria, China, Corea del Norte, Cuba, Egipto, India, Irán, Israel, Laos, Libia, Siria, Taiwan y Vietnam.

Entre todos estos agentes infecciosos, el bacilo del carbunco es el prototipo de agente bacteriológico militarizable: es suficiente un pequeño laboratorio, casi rudimentario, para fabricar sin muchos medios y en poco tiempo grandes cantidades de bacterias y de esporas. Por último, la bacteria tiene un gran poder patógeno y sus esporas se conservan bien en cualquier entorno; pueden deslizarse en el interior de diversos objetos y comportan una mortalidad nada desdeñable en las personas contaminadas. La inquietud puede dar paso a la psicosis.

El *Bacillus anthracis*, como el resto de los agentes del bioterrorismo, es un arma perniciosa, invisible, indetectable (al principio) e imperceptible. Ante tales armas, la población civil y militar es impotente. Cuando se ha conseguido identificar el agente implicado, es las más de las veces demasiado tarde para llevar a cabo un tratamiento terapéutico apropiado en los afectados.

Estos ataques también movilizan la producción: se almacenan vacunas y antibióticos, se fabrican máscaras de gas, vestimentas especiales y diferentes medios de protección. Esta gama de medidas protectoras frente a las armas biológicas debe reajustarse y modificarse sin cesar; los conocimientos y métodos sobre genética y biología molecular evolucionan y las armas biológicas se aprovechan de estos progresos. En el Instituto de Obolensk, en la región de Moscú, los investigadores rusos han fabricado mediante ingeniería genética una cepa de bacilo carbuncoso resistente a los antibióticos y a la vacuna carbuncosa.

Bibliografía complementaria

BACILLUS ANTHRACIS ET GUERRE BIOLOGIQUE. F. Ramisse et al. en *Bull. Soc. Fr. Microbiol.*, vol. 13, págs. 145-151, 1998.

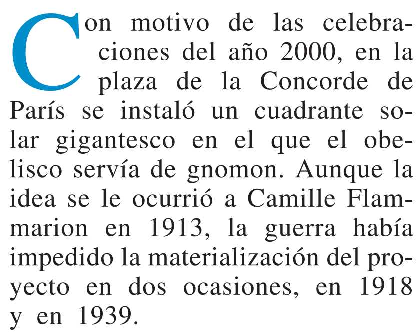
ANTHRAX. THE INVESTIGATION OF A DEADLY OUTBREAK. J. Guillemin. University of California Press, Berkeley, 1999.

HISTOIRE DES BACTÉRIES ET DES HOMMES. Willy Hansen y Jean Freney. Éditions Privat (de próxima aparición).

Los cuadrantes solares

Los cuadrantes solares han desempeñado un papel decisivo en la medición del tiempo, desde la antigüedad hasta el Renacimiento, cuando se generalizaron los relojes

Denis Savoie



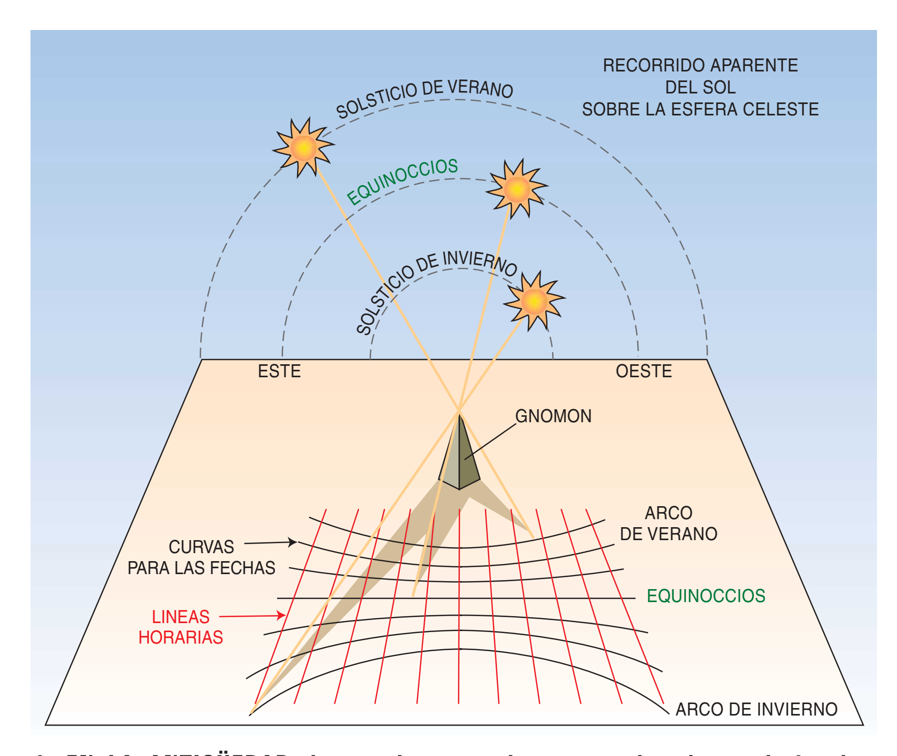
Con motivo de las celebraciones del año 2000, en la plaza de la Concorde de París se instaló un cuadrante solar gigantesco en el que el obelisco servía de gnomon. Aunque la idea se le ocurrió a Camille Flammarion en 1913, la guerra había impedido la materialización del proyecto en dos ocasiones, en 1918 y en 1939.

La "nave solar" instalada cerca de Tavel, entre Avignon y Nîmes, se construyó en 1993 (*véase la fotografía a la izquierda del título*). Este cuadrante solar consta de dos estilos polares cuyas sombras se proyectan sobre las superficies estampadas de cuatro planos triangulares situados sobre una base de 26 metros de longitud. En el suelo se han incrustado dos cuadrantes horizontales y una línea meridiana. Alrededor de la nave solar pueden verse ocho estelas que recuerdan las etapas más importantes de la gnomónica. El conjunto constituye el mayor cuadrante solar existente en Francia. Estas instalaciones se insertan en una tradición que se pierde en la noche de los tiempos *medidos*.

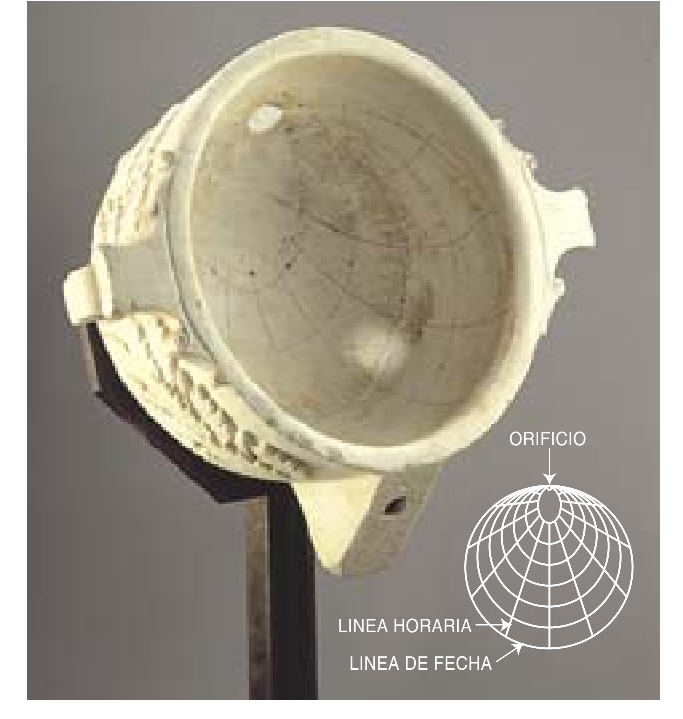
Cronos y Apolo

Según el historiador Herodoto (siglo V antes de nuestra era), los griegos importaron de Babilonia el gnomon. Este antepasado del cuadrante solar, cuyo nombre en griego significa "indicador", no es más que un estilo vertical cuya sombra se proyecta sobre una superficie plana horizontal. Para dividir el tiempo, los griegos utilizaban las variaciones diarias de la dirección y la longitud de la sombra: infinita en el instante del orto solar, la sombra va menguando hasta el mediodía y crece indefinidamente hasta el ocaso. El cuadrante antiguo marcaba horas "desiguales" (*véase la figura 1*): el día estaba dividido en 12 horas, cuya duración oscilaba (a nuestras latitudes) entre los 80 minutos en el solsticio de verano y los 40 minutos en el solsticio de invierno, pasando por los 60 minutos en los equinoccios.

El tiempo se siguió midiendo así hasta la aparición de los relojes. Sin embargo, en la antigüedad el cuadrante solar servía sobre todo para determinar la latitud del lugar. A medida que nos acercamos al ecuador, el Sol culmina cada vez a mayor altura y su sombra a mediodía es cada vez menor.



1. EN LA ANTIGÜEDAD, los cuadrantes solares marcaban horas desiguales: el día estaba dividido en 12 horas, cuya duración aumentaba en verano y disminuía en invierno. Las 11 líneas horarias servían para determinar la hora. También podía conocerse la fecha, a partir de siete curvas correspondientes a los meses. Cada uno de los seis intervalos definidos entre las curvas servía para dos meses, separados por medio año, ya que el Sol pasa dos veces al año por la misma declinación. El extremo de la sombra del gnomon siempre se encuentra entre las curvas correspondientes a los solsticios de verano e invierno. En los equinoccios, la sombra recorre una recta.



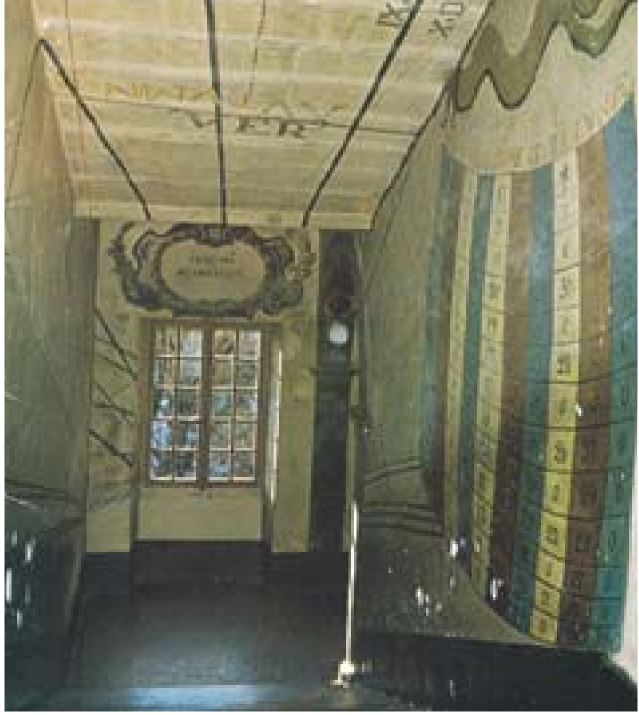
2. CUADRANTE SOLAR CARTAGINES del siglo I de nuestra era. Hay que inclinar el recipiente hasta que el orificio se sitúe en la dirección del cenit. Para conocer la hora y la fecha atendemos a la posición de la mancha luminosa formada por los rayos del Sol sobre una red constituida por once líneas horarias y siete curvas de fechas (*en la esquina inferior derecha se muestra la proyección plana de dicha red*). El principio es el mismo que en la figura 1.



3. EN EL AÑO 10 ANTES DE NUESTRA ERA, el emperador Augusto (63 a.C.-14 d.C.) mandó traer de Egipto a Roma este obelisco de 22 metros de altura, que se utilizó como cuadrante solar. Proyectaba su sombra sobre un suelo de mármol en forma de semicírculo. Para facilitar la lectura de la hora, los romanos colocaron una pequeña esfera en lo alto del obelisco.



4. CUADRANTE SOLAR DE ESTILOS POLARES de Ottrot (Alsacia). Las placas metálicas de sus 24 caras tienen un borde (*en rojo en la figura*) paralelo al eje de rotación de la Tierra. La hora viene dada por la superposición de la sombra con una graduación específica. El cuadrante se remonta al siglo XVIII y permite saber la hora en Alsacia, Grecia, España, Suiza, Antioquía, India, Japón, etc.



5. CUADRANTE SOLAR del siglo XVII. Se encuentra en el Liceo Stendhal de Grenoble. Una mancha luminosa proyectada por dos pequeños espejos fijos sobre el antepecho de la ventana se desplaza sobre una red de rectas y curvas dibujadas sobre unos 100 metros cuadrados de paredes y techo. La mancha indica la hora, el mes, la estación, el signo del zodíaco, etc.

El autor

DENIS SAVOIE preside la comisión de cuadrantes solares de la Sociedad Astronómica de Francia.

El cuadrante antiguo solía ser esférico, cónico o troncocónico. En el Museo del Louvre se conserva uno de los modelos más raros de cuadrantes solares. Se descubrió en Cartago y posiblemente fuese construido en el siglo I de nuestra era. Pertenece a un tipo que se caracteriza por presentar forma semiesférica y en su interior disponer de un estilo fijo; doce líneas perpendiculares al contorno de la semiesfera sirven para indicar las horas. El ejemplar del Louvre es muy original. Se trata de un recipiente de mármol grisáceo que hay que inclinar hasta que el orificio practicado en él se sitúe en la dirección del cenit (*véase la figura 2*). Los rayos solares penetran por el orificio y forman una mancha luminosa que se desplaza sobre el fondo del recipiente. La posición de la mancha con respecto a siete curvas cerradas, grabadas en el fondo, permite saber la fecha. Estas siete curvas delimitan seis intervalos, cada uno de los cuales corresponde a dos meses, ya que el Sol pasa dos veces al año por la misma declinación. Las curvas de los extremos corresponden a los solsticios. El cuadrante dispone, asimismo, de 11 curvas cerradas, las líneas horarias, que delimitan 12 partes en el cuadrante.

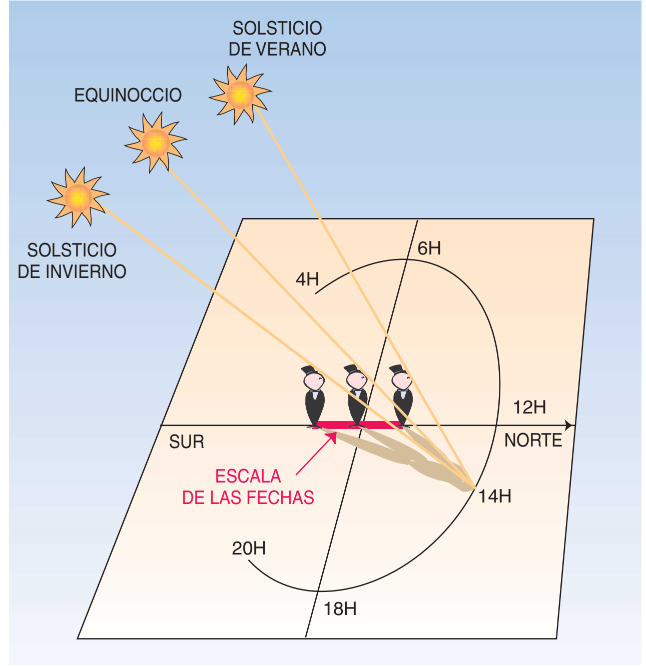
Menos frecuentes incluso son los cuadrantes antiguos planos: los hay horizontales, caso del gnomon, o verticales. En el año 10 antes de nuestra era, Augusto mandó construir uno en el Campo de Marte de la capital del imperio. El cuadrante consistía en un obelisco de unos 22 metros de altura traído de Heliópolis. Aunque la columna sigue en pie, está ahora en la plaza Montecitorio (*véase la figura 3*). Proyectaba su sombra sobre un suelo de mármol en forma de semicírculo. Al igual que el ejemplar del Museo del Louvre, el romano no disponía de ninguna graduación, y sólo podía saberse la hora por la posición del extremo de la sombra sobre las líneas horarias. Este tipo de cuadrante solar presenta un inconveniente: el extremo de la sombra pierde nitidez cuando se encuentra en la penumbra. Colocando una pequeña esfera en lo alto del obelisco, los romanos intentaron paliar esta dificultad y obtener una sombra más nítida.

Los cuadrantes de estilo polar

Durante el Renacimiento apareció una novedad en Europa: el cuadrante solar de estilo polar, es decir, paralelo al eje de rotación de la Tierra (en la dirección de la estrella polar). En este modelo, importado del mundo árabe, la hora viene determinada por la alineación de la sombra del estilo con la línea horaria que aparece sobre el cuadrante. Cuando la sombra cae entre dos líneas horarias, hay que proceder a una interpolación.

El cuadrante de estilo polar de Ottrot (Alsacia) tiene forma poliédrica (*véase la figura 4*). Se construyó en el siglo XVIII, pero es representativo del modelo renacentista de cuadrante de estilo polar. Tiene 26 caras, y en 24 de ellas se encuentran cuadrantes solares independientes. Todos llevan incorporadas placas metálicas, uno de cuyos bordes, en función de estilo, siempre es paralelo al eje de rotación





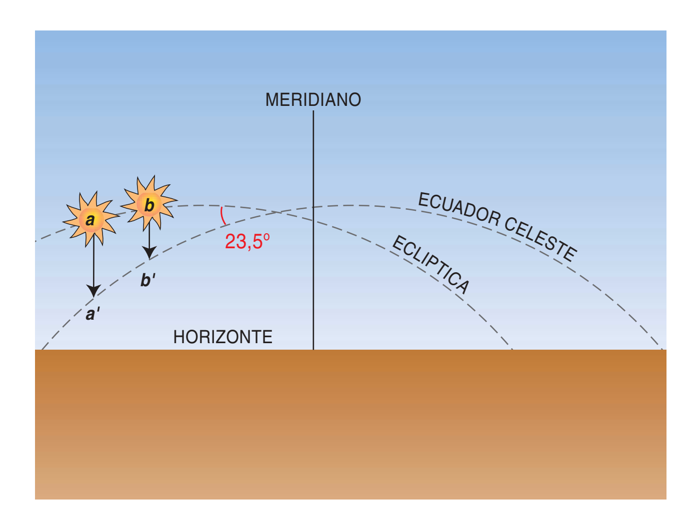
6. EL CUADRANTE SOLAR DE MONTPELLIER (*derecha*) es analémico: la graduación horaria está inscrita en una elipse, cuyo eje menor consta de una escala de fechas. Para saber la hora, la persona se coloca sobre el punto de la escala correspondiente al día de la observación; la sombra de su brazo indica la hora sobre la graduación elíptica.

de la Tierra. Cada cuadrante dispone de su propia graduación y permite conocer la hora en Alsacia, Grecia, España, Suiza, Antioquía, India, Japón, etc., así como la hora babilónica (el número de horas que han transcurrido desde la salida del Sol) y la ahora itálica (el número de horas desde la puesta de Sol anterior). En la actualidad, los cuadrantes de estilo polar son los más frecuentes. Decoran las fachadas de casas principales y las torres de iglesias y castillos.

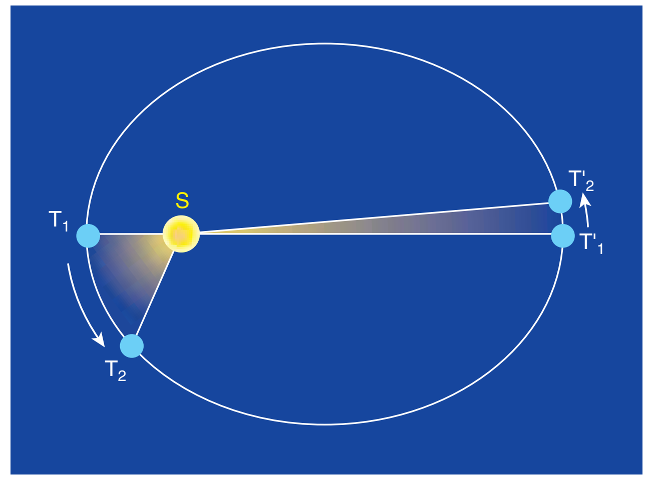
En el siglo XVII apareció el cuadrante analémico, un cuadrante horizontal cuya graduación horaria se halla inscrita en una elipse. Dicha elipse es la proyección del ecuador celeste (intersección del plano ecuatorial terrestre con la esfera celeste) sobre el suelo. El eje menor de la elipse sigue la dirección del meridiano del lugar y consta de una escala de fechas sobre las que se coloca un estilo móvil, o una persona (*véase la figura 6*), en el punto correspondiente al día de la observación. La sombra del estilo se proyecta entonces sobre la graduación elíptica y permite conocer la hora. El cuadrante solar de Brou, cerca de Bourg-en-Bresse (Ain), fue construido en el siglo XVIII y tiene un eje mayor de unos 11 metros y un eje menor de unos 8 metros. Los de Dijon, Montpellier y Avignon se basan en el mismo modelo.

También en el siglo XVII, en 1673, el Padre Bonfa construyó un cuadrante solar realmente único, en las paredes de la escalera del hoy Liceo Stendhal de Grenoble (*véase la figura 5*), a la sazón colegio de los jesuitas. En unos 100 metros cuadrados de paredes y techo trazó una red de rectas y curvas complejas sobre las que se desplaza una mancha luminosa proyectada por dos espejitos fijos, situados sobre el antepecho de las ventanas de la cara sur del edificio. Se trata de un cuadrante solar de reflexión que indica la hora, el mes, la estación, el signo del zodíaco, las horas del orto y el ocaso (sólo en determinadas épocas del año). Las pinturas murales permiten también conocer la hora en otros países, así como la hora lunar. Probablemente el Padre Bonfa se basó en reiteradas observaciones.

Desde el siglo XVIII se multiplicaron los relojes públicos. Para ponerlos en hora se utilizó un tipo de cuadrante solar nuevo, llamado meridiana, que da la "hora solar verdadera" a mediodía. Dicha hora, la que se pauta en un cuadrante solar, no coincide con la que se lee en nuestros relojes, debido a que no es uniforme. Dos motivos hacen que no lo sea. Por un lado, el eje de rotación de la Tierra forma un ángulo de unos 23 grados con la perpendicular a la eclíptica (el plano de la órbita terrestre). Entre dos mediodías consecutivos el Sol se desplaza sobre la esfera celeste a lo largo de la eclíptica (*véase la figura 7*). Ahora bien, visto desde la Tierra, el Sol ha avanzado un arco que no corresponde a su recorrido sobre la eclíptica, sino a la proyección de éste sobre el plano ecuatorial terrestre. La diferencia entre estos dos arcos varía a lo largo del año (es mínima en los



7. LA HORA SOLAR MEDIA, la de nuestros relojes, se define con respecto a un sol imaginario que recorriera el plano ecuatorial. Representa el tiempo que tardaría en desplazarse un arco de 15 grados sobre el ecuador celeste (la intersección del plano del ecuador terrestre con la esfera celeste). Para comparar la hora solar verdadera, que puede leerse en los cuadrantes solares y que está relacionada con el movimiento del Sol sobre la eclíptica, con la hora solar media, se proyecta sobre el ecuador el arco *ab* recorrido por el Sol sobre la eclíptica en una hora. El arco *a'b'* que se obtiene no mide 15 grados, lo cual da lugar a una de las dos desigualdades en la hora solar verdadera.



8. EL ASTRONOMO JOHANNES KEPLER descubrió el carácter elíptico de las órbitas de los planetas y enunció la "ley de las áreas": el tiempo que tarda la Tierra en pasar de un punto a otro de su órbita es proporcional al área barrida por el radio Tierra-Sol durante ese tiempo. Así, el tiempo que tarda la Tierra en recorrer la distancia de T_1 a T_2 es igual al que tarda en recorrer la distancia de T'_1 a T'_2, ya que las áreas ST_1T_2 y $ST'_1T'_2$ son iguales, siendo S el Sol. Por tanto, la Tierra se desplaza más despacio cuanto más lejos se encuentra del Sol. En la figura, se ha representado la órbita terrestre con una excentricidad muy exagerada (de hecho, la órbita es casi circular).



9. LA MERIDIANA de la iglesia de Saint-Sulpice de París consiste en una tira de cobre encastrada en el mármol del suelo. La mancha luminosa se debe a los rayos de Sol que atraviesan un agujero practicado en una de las vidrieras del transepto sur. Cuando la mancha cae sobre la meridiana, es mediodía solar.

equinoccios de primavera y otoño) y da lugar a una desigualdad en el intervalo entre dos mediodías consecutivos y, por tanto, en la hora solar.

Por otro lado, según la "ley de las áreas", la velocidad de la Tierra a lo largo de su órbita aumenta a medida que se acerca al Sol (*véase la figura 8*). Cuanto más rápido se desplaza, más rápido tendrá la Tierra que girar sobre sí misma para volver a ocupar la misma posición con respecto al Sol. Este fenómeno introduce una desigualdad en el día y en la hora solar durante el año.

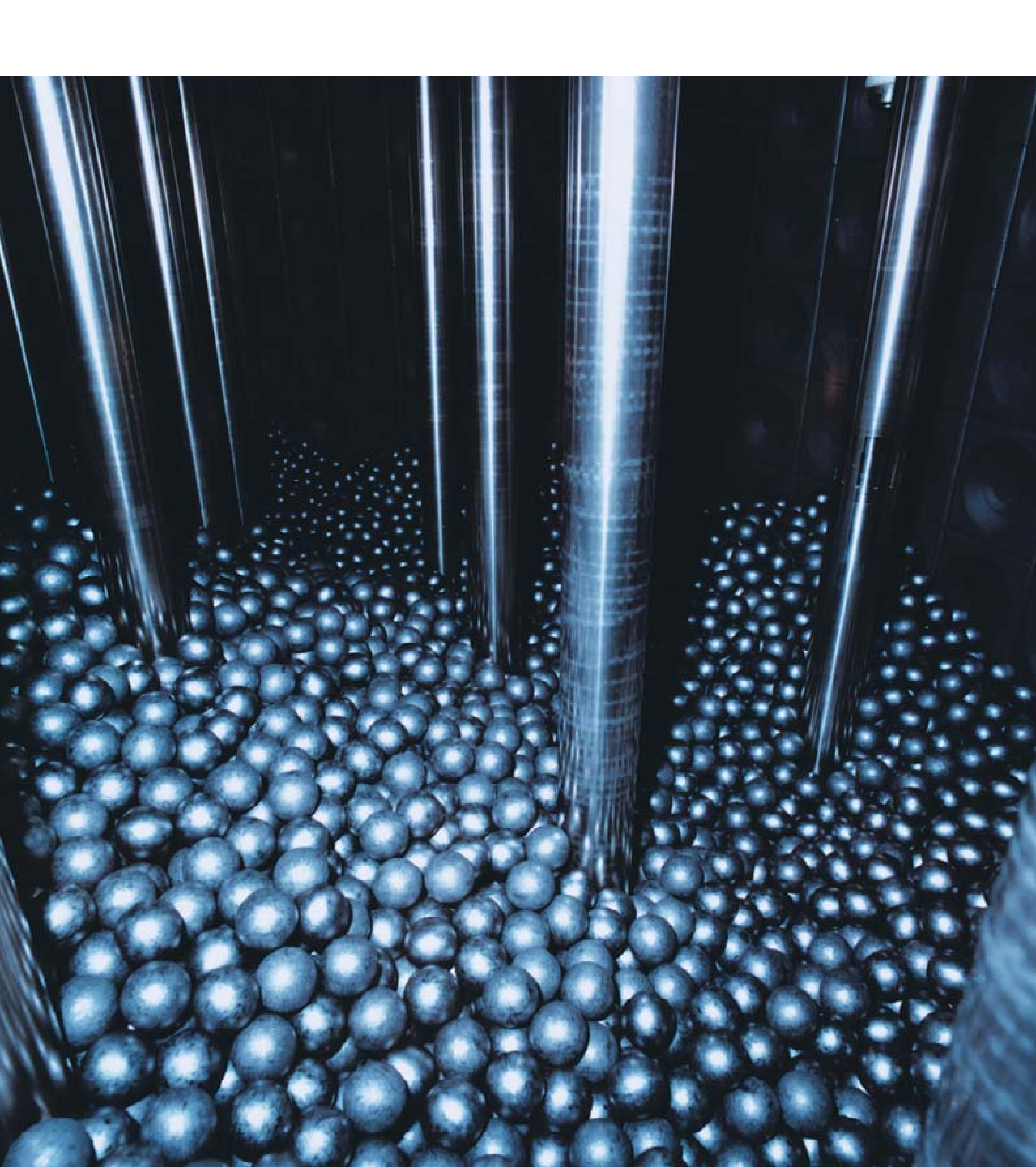
Meridianas y relojes

En 1727, el relojero Henry Sully inició la construcción de la meridiana de la iglesia de Saint-Sulpice de París. A su muerte, el astrónomo Charles Le Monnier prosiguió el trabajo. Se trata de una tira de cobre, de 40 metros de longitud, encastrada en el mármol del suelo del templo (*véase la figura 9*). Se inicia en el transepto sur y recorre la iglesia hasta un obelisco situado en el crucero norte. En una de las vidrieras del transepto sur se ha practicado un agujero, a unos 24 metros de altura, por el que entran los rayos de Sol y forman, a mediodía, una mancha luminosa sobre la tira de cobre. Unas placas de cobre materializan la posición de la mancha luminosa en los equinoccios y los solsticios. De hecho, en la vidriera hay dos agujeros, pero, debido a la inclinación de los rayos solares, la mancha luminosa procedente del agujero inferior no se proyecta sobre la meridiana de septiembre a abril y la del agujero superior del 1 de junio al 12 de julio. Fuera de estos dos períodos puede verse, por lo menos, uno de los dos agujeros.

En el siglo XIX la hora solar media se hizo obligatoria en Francia. Se pretendía que todos los relojes marcasen la misma hora. La diferencia entre el tiempo solar medio y el tiempo solar verdadero se llama ecuación del tiempo. Varía diariamente y es de –16 minutos en noviembre y de +14 minutos en febrero. En la actualidad, para deducir la hora de nuestros relojes a partir de la que se lee en un cuadrante solar, hay que añadir a ésta la ecuación del tiempo, así como una corrección en longitud. Antes del siglo XIX, cada ciudad contaba con su hora propia, pero el desarrollo de los medios de comunicación, especialmente el ferrocarril, obligó a la adopción de una hora única. Primero fue la del meridiano de París y, desde 1911, la del meridiano de Greenwich. A las correcciones citadas hay que añadir, además, una hora en invierno y dos en verano.

Francia cuenta con uno de los patrimonios de cuadrantes solares más ricos del mundo. Se conocen unos 12.000 ejemplares. Aquí nos hemos ceñido a algunos de los más notables. La comisión de cuadrantes solares de la Sociedad Astronómica de Francia se ocupa de la catalogación de este patrimonio, y espera contribuir a conservarlo y darlo a conocer, en particular como instrumento pedagógico para la comprensión de fenómenos ligados a la astronomía como las estaciones, el movimiento de la Tierra alrededor del Sol o la definición de la hora. La catalogación de los cuadrantes solares no ha terminado todavía, pues cada día se añaden nuevos cuadrantes a la larga lista de los antiguos.

NUEVA GENERACION DE



LA ENERGIA NUCLEAR

Unos reactores nucleares nuevos, más seguros y austeros, satisfarían gran parte de nuestras necesidades de consumo energético y además combatirían el calentamiento global

James A. Lake, Ralph G. Bennett y John F. Kotek

El alza de los precios de la energía eléctrica y la ola de apagones del verano pasado en California vuelven a llamar la atención sobre el papel esencial de la energía nuclear en el suministro eléctrico de los Estados Unidos. En la actualidad, 103 plantas nucleares abastecen la quinta parte del consumo del país. Y pese a la reticencia pública tras los amargos episodios de Chernobyl y Three Mile Island, el sector ha tenido en cuenta la lección y conseguido una elevada seguridad en los últimos diez años. La fiabilidad y la eficacia de las plantas nucleares han alcanzado niveles hasta ahora desconocidos. El debate actual sobre si debe reducirse la emisión de gases de invernadero ante la amenaza del calentamiento global ha hecho que se vaya mirando de otra forma a los reactores nucleares; ahora son cada vez más quienes reconocen que las centrales atómicas producen electricidad sin emitir a la atmósfera dióxido de carbono ni otros contaminantes, como los óxidos de nitrógeno o los compuestos de azufre que crean el *smog*. Se prevé que la demanda mundial de energía crezca en un 50 por ciento hacia 2030 hasta duplicarse en torno al año 2050.

Antes de que se reanude la construcción a gran escala de centrales nucleares deben abordarse cuestiones peliagudas relativas a la viabilidad económica inmediata, el funcionamiento más seguro, la eficacia de la gestión de residuos y la utilización de recursos; además, hay que ver cómo se impide la proliferación del armamento. En todos estos aspectos influye el diseño del sistema de reactores nucleares que se elija.

Los proyectistas de sistemas nucleares adoptan enfoques novedosos en busca del éxito. Ahora, ante todo, tienen muy presente el ciclo entero del combustible nuclear, desde la extracción del mineral hasta el tratamiento de los residuos, sin olvidar la infraestructura que cada paso necesita. En segundo término, evalúan en qué medida cada sistema satisfaría las necesidades actuales sin poner en peligro la prosperidad de las generaciones futuras, es decir, la viabilidad a largo plazo de esos sistemas. Procediendo de esta forma se arroja luz sobre la interrelación entre el suministro de energía y las necesidades del medio ambiente y la sociedad. La importancia dada a la viabilidad a largo plazo quizá tenga como consecuencia que la energía nuclear no sólo se aproveche en el futuro para generar energía eléctrica; el combustible de hidrógeno para la automoción podría ser otro de sus productos. Por otra parte, esa insistencia en la viabilidad a largo plazo promueve la investigación de diseños alternativos de reactores y de procesos de reciclado del combustible nuclear que reduzcan notablemente los residuos y extraigan además una mayor proporción de la energía contenida en el uranio.

Estamos convencidos de que la producción de energía nuclear a gran escala presenta claras ventajas sobre otras fuentes de energía, si bien habrá de superar obstáculos de consideración para adaptarse de la mejor manera posible a los nuevos tiempos.

1. UNA PILA DE GRANULOS: el núcleo de un reactor nuclear experimental alemán refrigerado por gas consta de unas barras de control y de unos nódulos de uranio combustible y de grafito que tienen el tamaño de una bola de billar.

Los autores

JAMES A. LAKE, RALPH G. BENNETT y JOHN F. KOTEK desempeñan papeles destacados en el programa de energía nuclear de EE.UU. Lake es director asociado del Laboratorio Nacional de Ingeniería y Medio Ambiente de Idaho. Bennett es miembro del equipo que coordina los proyectos del Departamento concernientes a la Generación IV. Kotek dirige la sección especial de proyectos del Laboratorio Nacional de Argonne.

Los sistemas nucleares del porvenir

Ante la dificultad de lograr sistemas de energía nuclear viables a largo plazo, con un nivel de seguridad suficientemente elevado y una base eco-



nómica competitiva, el Departamento de Energía de EE.UU. inició en 1999 el programa de la Generación IV. El nombre alude a la clasificación de los diseños nucleares en cuatro grandes categorías: los primeros prototipos de reactores (Generación I), las grandes centrales nucleares actuales (Generación II), los reactores avanzados de agua ordinaria y otros sistemas inherentemente seguros diseñados en los últimos decenios (Generación III) y los sistemas que se diseñarán y construirán de aquí a veinte años (Generación IV). Para el año 2000, el interés internacional por el proyecto de la Generación IV había cristalizado en una coalición de nueve países: Argentina, Brasil, Canadá, Corea del Sur, EE.UU., Francia, Japón, Reino Unido y Sudáfrica. Estas naciones planifican y comparten las tareas de investigación y desarrollo de los futuros sistemas de energía nuclear.

Aunque el programa de la Generación IV explora una gran variedad de sistemas nuevos, bastarán unos pocos ejemplos para que queden claras las líneas generales que se siguen en pos de los objetivos propuestos. Los sistemas de la nueva generación se basan en tres grandes clases de reactores: los refrigerados por gas, los refrigerados por agua y los de espectro rápido.

Reactores refrigerados por gas

Se han construido y hecho funcionar con éxito reactores nucleares que utilizan como refrigerador del núcleo un gas (habitualmente helio o dióxido de carbono), pero hasta ahora su utilización ha sido escasa. Una posibilidad especialmente atractiva, el reactor modular de lecho granulado, presenta en su diseño numerosas características que se aproximan bastante a los objetivos de la Generación IV. Equipos de ingeniería de China, Sudáfrica y EE.UU. trabajan en el desarrollo de este sistema, y Sudáfrica proyecta construir un prototipo a escala real que empezaría a funcionar en 2006.

El diseño del reactor de lecho granulado se basa en un elemento de combustible fundamental, el gránulo. Es una esfera de grafito del tamaño de una bola de billar que encierra unas 15.000 partículas de óxido de uranio del grosor de las semillas de amapola (*véase el recuadro* "Reactor nuclear refrigerado por gas"). Cada una de las partículas uniformemente esparcidas está recubierta por varias capas de materiales muy densos. Una de las capas, de cerámica dura de carburo de silicio, es el recipiente que retiene los productos de la fisión nuclear durante el funcionamiento del reactor o en caso de variaciones accidentales de temperatura. Unos 330.000 gránulos combustibles esféricos se alojan en un recinto metálico rodeado por un blindaje de bloques de grafito. Además, se introducen en el núcleo hasta 100.000 gránulos de grafito sin carga de combustible; al interponerse entre los gránulos de

RUDIMENTOS DE ENERGIA NUCLEAR

Las centrales nucleares del mundo son en su mayoría reactores de agua a presión. En estos sistemas el agua, sometida a alta presión (155 atmósferas) para que no hierva, actúa a la vez como refrigerante y como fluido impulsor de las turbinas. Este tipo de reactor se desarrolló en Estados Unidos a partir de la experiencia adquirida en el programa del reactor naval americano; la primera unidad comercial empezó a funcionar en 1957.

El núcleo de un reactor de agua a presión está formado por una serie de retículos de barras de combustible nuclear, compuestas por unos pequeños cilindros ("pellets"), del diámetro de una moneda, de óxido de uranio ligeramente enriquecido; están revestidas con una aleación de circonio. Un retículo cuadrado, de 17 × 17 barras, constituye un grupo de combustible; componen el núcleo del reactor unos 200 grupos de éstos. Los núcleos suelen medir unos 3,5 metros de diámetro y 3,5 metros de altura; están encerrados en vasijas de acero resistente a la presión cuyas paredes tienen de 15 a 20 centímetros de espesor.

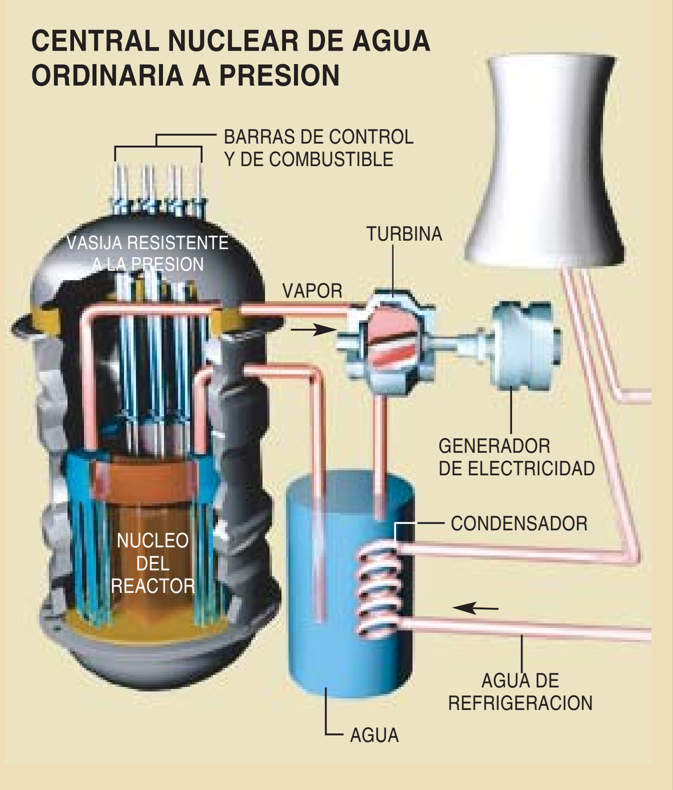
Las reacciones de fisión nuclear producen calor que se extrae mediante la circulación de agua. Se bombea el refrigerante en el núcleo a unos 290 grados de temperatura, y sale de él a unos 325 grados. Para controlar el nivel de potencia se insertan barras de control en el interior de los retículos de combustible. Los materiales de que están hechas moderan la reacción de fisión al absorber los neutrones lentos (térmicos) que en ella se emiten. La velocidad de la reacción nuclear se controla sacando del núcleo las barras del control o metiéndolas en él. Para detener la reacción en caso de accidente o cuando hay que cambiar el combustible se introducen las barras hasta el fondo del núcleo.

En el circuito primario de refrigeración del reactor, el agua caliente sale del núcleo del reactor y pasa a través de un intercambiador de calor (llamado generador de vapor), donde entrega su calor a un circuito de vapor secundario que funciona a un nivel de presión inferior. El vapor producido en el intercambiador de calor se expansiona después en una turbina de vapor que a su vez hace girar un generador eléctrico (por lo común con una potencia de 900 a 1100 megawatt). El vapor se condensa a continuación y es bombeado de nuevo al intercambiador para completar el circuito. Salvo por la fuente de calor, las centrales nucleares son bastante parecidas a las centrales eléctricas alimentadas por carbón o combustibles fósiles.

Existen diversas variantes del reactor refrigerado por agua ordinaria. La más notable es el reactor de agua en ebullición, que funciona a una presión más baja (usualmente 70 atmósferas) y genera vapor directamente en el núcleo, así que no necesita un intercambiador de calor intermedio. En un menor número de plantas el fluido refrigerante del reactor es agua pesada (que contiene deuterio, un isótopo del hidrógeno), dióxido de carbono gaseoso o un metal líquido como el sodio.

La vasija resistente a la presión del reactor suele alojarse dentro de un búnker de hormigón que actúa como pantalla para la radiación; el búnker, a su vez, está encerrado en un edificio de hormigón armado diseñado para impedir fugas de fluidos o gases radiactivos en caso de accidente.

—J.A.L., R.G.B. y J.F.K.



combustible calientes configuran allí la distribución de potencia y temperatura.

Se utilizan en todo el núcleo materiales refractarios resistentes al calor, a fin de que el sistema de lecho granulado pueda funcionar a temperaturas muy superiores a los 300 grados que de ordinario se alcanzan en los reactores refrigerados por agua ordinaria (Generación II). El fluido impulsor de la turbina, el helio, sale del núcleo a 900 grados y se inyecta directamente en un sistema de turbina/generador movido por gas que produce electricidad con un rendimiento comparativamente alto, el 40 por ciento, un cuarto más que en los reactores de agua ordinaria actuales.

El tamaño más reducido y la sencillez general del diseño abundan en la viabilidad económica inmediata de los reactores de lecho granulado. Cada módulo de potencia, que produce 120 megawatt, se instala en la décima parte del espacio que ocupa hoy una central de energía nuclear, lo que permite el desarrollo de proyectos más flexibles y de proporciones más modestas que quizás ofrezcan mejores resultados económicos. Por ejemplo, es posible prefabricar los módulos del sistema para su poste-

DEBATE SOBRE LA ENERGIA NUCLEAR

Cuatrocientas treinta y ocho centrales nucleares generan hoy cerca del 16 por ciento de la energía eléctrica mundial. En EE.UU. hay 103, que suministran alrededor del 20 por ciento de la producción de electricidad de la nación. Aunque no se hayan contratado instalaciones nucleares nuevas desde hace más de veinte años, los generadores estadounidenses han aumentado su producción casi en un 8 por ciento anual gracias a la madurez y mayor eficiencia del sector. Sólo en los últimos 10 años, las centrales nucleares de EE.UU. han añadido más de 23.000 megawatt —equivale a 23 grandes centrales— al suministro total de electricidad, pese a que no se ha construido ninguna nueva. Mientras tanto, el aumento de la producción ha reducido el coste unitario de la generación de energía nuclear. Esta mejora ha despertado el interés empresarial por ampliar las licencias de explotación y tal vez por adquirir nuevas instalaciones nucleares.

Puede sorprender a algunos que el uso de la energía nuclear aporte beneficios directos al entorno, específicamente a la calidad del aire. Aunque no se zanje el debate acerca de la posible alteración del clima terrestre por las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de invernadero, no cabe duda alguna de que la contaminación del aire por la quema de combustibles fósiles es perjudicial para la salud. Al contrario que las centrales que utilizan combustibles fósiles, las nucleares no producen dióxido de carbono, azufre u óxidos de nitrógeno. La producción de energía nuclear en EE.UU. evita la emisión anual de más 175 millones de toneladas de carbono que habrían llegado al entorno si se hubiese generado la misma cantidad de energía eléctrica quemando carbón.

Se ha prestado escasa atención a la capacidad de la energía nuclear de producir hidrógeno, que podría utilizarse en pilas de combustible para la automoción y en otras centrales de energía más limpias. Un método muy directo consiste en emplear la energía de un reactor nuclear de alta temperatura en que el vapor caliente reaccione con metano y se desprenda hidrógeno. Sin embargo, este proceso también crea dióxido de carbono como subproducto. Hay varias reacciones termoquímicas directas que pueden generar hidrógeno utilizando agua y altas temperaturas. En Japón y EE.UU. se están investigando la descomposición termoquímica del ácido sulfúrico y otras reacciones que proporcionan hidrógeno. Queda por demostrar la rentabilidad del hidrógeno obtenido por la vía nuclear, pero las posibilidades son enormes; podría quizás implantarse un nuevo modo de cogeneración de electricidad e hidrógeno.

Mayor rentabilidad

Toda construcción nuclear en los EE.UU. debe enfrentarse a difíciles problemas económicos relativos a los costes y financiación del capital. El problema es que la actual generación de centrales nucleares, representada por los tres diseños avanzados de reactor de agua ordinaria homologados por la Comisión Nuclear Reguladora, producen electricidad a un coste de 1500 dólares por kilowatt, que tal vez no sea suficientemente competitivo como para reanudar la construcción de centrales nucleares. Como objetivo de las centrales de las Generaciones III y IV se propone un coste de 1000 dólares por kilowatt. Si esto se consiguiera, dichas plantas podrían competir (por su coste unitario) con la alternativa más económica, la planta de gas natural de ciclo combinado. Por añadidura, las instalaciones de la siguiente generación habrían de terminarse en unos tres años para que los costes de financiación no se desbocasen. Acelerarían las cosas unos procedimientos menos farragosos, pero aún no puestos en práctica, de concesión de licencias.



CENTRAL DE ENERGIA NUCLEAR de agua a presión de Palo Verde, a unos 70 kilómetros al oeste de Phoenix, Arizona.

A juzgar por las anteriores experiencias con los proyectos nucleares en EE.UU., será difícil alcanzar estos objetivos. Para lograr el nivel de coste deseado se está intentando elevar los rendimientos térmicos mediante el aumento de las temperaturas de funcionamiento y la simplificación de subsistemas y componentes. Para que las centrales se construyan más deprisa habrá que normalizar los diseños, la prefabricación y las certificaciones, dividir las centrales en módulos más pequeños que eviten tener que construir sobre el propio lugar de instalación, y utilizar técnicas computerizadas para la dirección del montaje. De este modo podrán comprobarse las obras por medio de la realidad virtual antes de ejecutarlas.

Aumento de la seguridad

A medida que en los últimos 20 años iba mejorando el rendimiento económico de la industria de energía nuclear, también lo hacía su seguridad. El accidente de Three Mile Island en 1979 puso ante los ojos de propietarios y operadores de plantas nucleares la necesidad de mejorar márgenes y resultados en lo que se refería a la seguridad. El número de los incidentes notificados a la Comisión Nuclear Reguladora como “de consideración” alcanzaba un promedio de dos por central y año en 1990, pero ha caído hasta menos de la décima parte en 2000. Entre tanto, según encuestas recientes, desde el accidente de Chernobyl en 1986 se ha recuperado en gran medida la confianza pública en la seguridad de la energía nuclear.

A petición del Departamento de Energía de EE.UU., expertos nacionales y de otros países enunciaron durante el pasado año los objetivos a largo plazo en materia de seguridad. Los clasificaron en tres grandes grupos: mejorar la seguridad



y fiabilidad de las instalaciones, disminuir la posibilidad de daños importantes durante el accidente y reducir al mínimo las posibles consecuencias del accidente una vez producido. Alcanzar esas metas exigirá nuevos diseños de las instalaciones. Habrá que incorporar medidas de seguridad intrínsecas que eviten los accidentes; si pese a todo ocurren, deberán impedir que evolucionen hacia situaciones más graves en las que se libere radiactividad al medio.

Eliminación y reutilización de los residuos

Es preciso abordar también problemas de peso relacionados con el tratamiento y evacuación de los residuos nucleares y la protección contra el riesgo de la proliferación nuclear. Se está evaluando si el depósito subterráneo de larga duración del monte Yucca podrá almacenar correctamente el combustible comercial consumido. Su construcción, sin embargo, lleva diez años de retraso, y aunque alguna vez se termine no podrá contener la cantidad de residuos que se prevé habrá en el futuro.

El actual ciclo "una sola vez cada paso", o abierto, del combustible nuclear toma el uranio recién extraído, lo quema una sola vez en el reactor y luego lo desecha. De esta manera se convierte en electricidad solamente el uno por ciento de la energía contenida en el uranio, y además se produce una gran cantidad de combustible nuclear ya consumido que ha de retirarse de manera segura. Ambos inconvenientes pueden evitarse reciclando el combustible consumido, es decir, recuperando los materiales aprovechables del mismo.

La mayoría de los países con grandes programas nucleares —Francia, Japón, el Reino Unido— utilizan el llamado ciclo cerrado del combustible nuclear. Consiste en reciclar el combustible consumido para recuperar el uranio y el plutonio (generado durante la irradiación en los reactores) y reprocesarlos a fin de obtener nuevo combustible. Se duplica así la cantidad de energía obtenida del combustible y elimina de los residuos la mayor parte de los elementos radiactivos de larga vida, que han de almacenarse a perpetuidad. Con todo, hay que decir que el combustible reciclado es hoy más caro que el recién extraído de la mina. Las técnicas de reciclado actuales también sirven para la separación del plutonio, que podría ser desviado a la fabricación de armamento nuclear.

En esencia, todo el reciclado de combustible nuclear se realiza siguiendo el proceso denominado PUREX (extracción de plutonio del uranio), concebido inicialmente para extraer plutonio puro destinado a las armas nucleares. En el reciclado PUREX los grupos de combustible consumidos se transportan a una planta de reciclado en contenedores fuertemente blindados y resistentes al deterioro. Los grupos se trocean y disuelven en ácidos fuertes. Para separar los productos de fisión y otros elementos del uranio y del plutonio se somete la solución de combustible resultante a un proceso de extracción del disolvente; se purifican el uranio y el plutonio así separados y se los utiliza para fabricar combustible nuclear de óxido mixto destinado a los reactores de agua ordinaria.

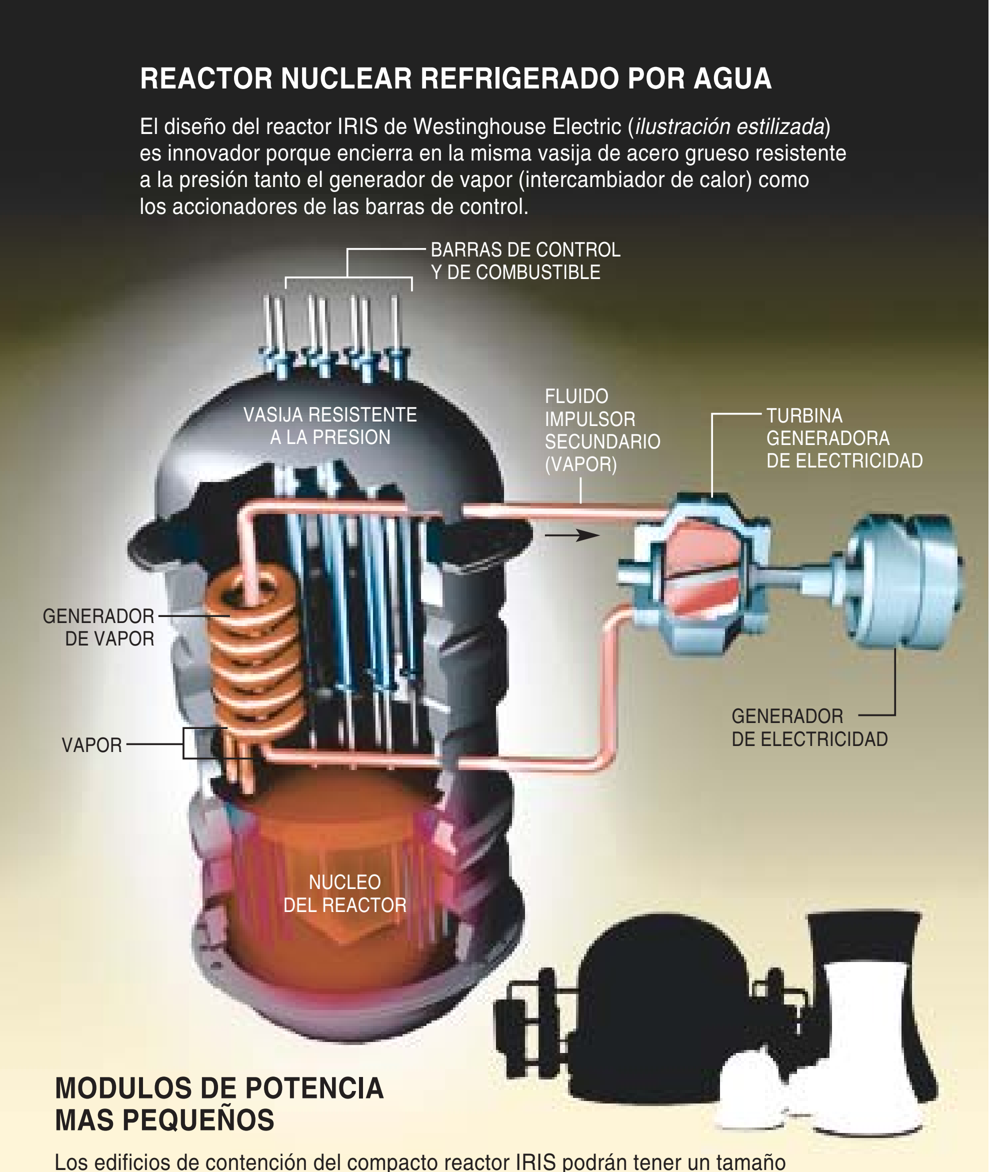
El reciclado minimiza la producción de residuos nucleares. Para reducir el espacio necesario para almacenarlos, un ciclo viable a largo plazo del combustible nuclear separaría los productos de fisión de corta vida y gran producción de calor, particularmente el cesio 137 y el estroncio 90. Se los guardarían aparte durante 300 o 500 años, hasta que su desintegración los hubiese vuelto seguros, en instalaciones refrigeradas por convección. Un ciclo cerrado (un reactor rápido) optimizado reciclaría no sólo el uranio y el plutonio, sino también todos los actínidos presentes en el combustible, incluidos el neptunio, el americio y el curio. En un ciclo abierto, más del 98 por ciento de la radiotoxicidad de larga duración esperada se debe al neptunio 237 y plutonio 242 resultantes (cuyos períodos de semidesintegración radiactiva alcanzan 2,14 millones y 387.000 años, respectivamente). Será más sencillo controlar los efectos a largo plazo de un almacén de residuos si estos actínidos de larga vida se separan y reciclan. La eliminación del cesio, estroncio y de los actínidos de los residuos enviados a un depósito geológico aumentaría 50 veces su capacidad.

Dado el persistente interés en mejorar la viabilidad a largo plazo y la rentabilidad de los ciclos del combustible nuclear, en distintos países se ponen a punto técnicas de reciclado más eficaces. En el Laboratorio Nacional de Argonne, en Estado Unidos, se desarrolla un proceso electrometalúrgico que impide la separación del plutonio puro. Similares ventajas ofrecen los procesos de reciclado en agua que se estudian en Francia, Japón y otros países.

Garantías contra la proliferación nuclear

Un factor de la mayor importancia en los nuevos sistemas de energía nuclear es la garantía de que no puede sustraerse del ciclo de reprocesado ningún material que se utilice militarmente. Cuando las naciones pasan a tener armas nucleares no suelen recoger materiales nucleares de las centrales nucleares de uso civil, sino que levantan instalaciones especializadas en la producción de materiales fisibles. Los ciclos de combustible nuclear para fines comerciales son generalmente el camino más difícil y costoso para producir material apto para el uso bélico. El diseño de nuevos ciclos de combustible deberá seguir teniendo en cuenta que la proliferación debe prevenirse

—J.A.L., R.G.B. y J.F.K.



REACTOR NUCLEAR REFRIGERADO POR AGUA

El diseño del reactor IRIS de Westinghouse Electric (*ilustración estilizada*) es innovador porque encierra en la misma vasija de acero grueso resistente a la presión tanto el generador de vapor (intercambiador de calor) como los accionadores de las barras de control.

MODULOS DE POTENCIA MAS PEQUEÑOS

Los edificios de contención del compacto reactor IRIS podrán tener un tamaño más pequeño. Además, la menor potencia de salida del reactor, de 100 a 350 megawatt, hace que estas unidades sean además menos costosas.

rior envío al lugar donde se los instalará.

El grado de simplicidad del sistema de lecho granulado en comparación con los diseños actuales es espectacular: estas unidades no contienen más de unas dos docenas de subsistemas de planta principales, por unos 200 en los reactores de agua ordinaria. Sus centrales funcionan con un intervalo de temperaturas que posibilita la producción de hidrógeno a partir del agua o de otros materiales con un bajo nivel de emisiones. Ese hidrógeno podría emplearse en pilas de combustible y motores de combustión limpia, dispositivos con los que podría conseguirse una economía energética viable a largo plazo basada en el hidrógeno.

Estos reactores de la próxima generación incorporan importantes medidas de seguridad. El refrigerante, el helio, es un gas noble, y por lo tanto no reacciona con otros materiales, ni siquiera a elevadas temperaturas. Además, al ser de material refractario los elementos de combustibles y el núcleo del reactor, no pueden fundirse. A las temperaturas extremas que se producen en los accidentes (más de 1600 grados Celsius) sólo se degradan, lo que permite un considerable margen de seguridad en el funcionamiento.

Que el combustible se reponga en el núcleo continuamente, sin interrumpir el funcionamiento ordinario del reactor —una vez por minuto, aproximadamente, se extrae un gránulo del fondo del núcleo y se introduce uno nuevo por la parte superior— aporta otras ventajas en materia de seguridad. De esa manera todos los gránulos van bajando por el núcleo y se renuevan totalmente al cabo de unos seis meses. El sistema contiene la cantidad de combustible óptima para su funcionamiento, con escasa reactividad fisible suplementaria; se suprime así toda una clase de accidentes que el exceso de reactividad puede causar en los actuales reactores refrigerados por agua. Además, el desplazamiento constante de los gránulos a través de regiones de alta y baja producción de potencia hace que soporten unas condiciones medias de funcionamiento menos extremas que en las configuraciones de combustible fijas; el margen de seguridad del sistema crece por eso. Una vez utilizados, los gránulos deben almacenarse en depósitos de larga duración, igual que se hace hoy con las barras de combustible ya gastadas.

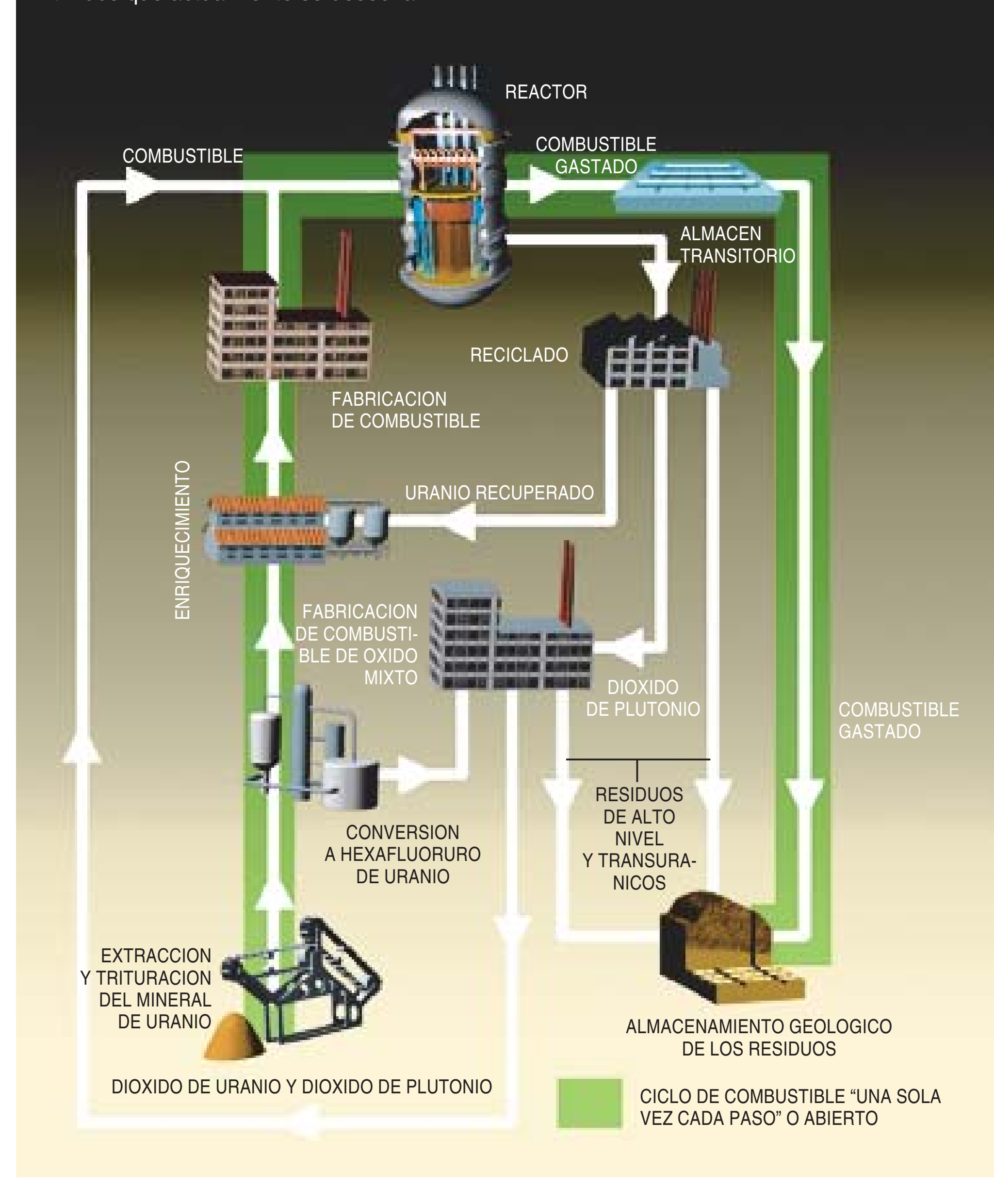
Reactores refrigerados por agua

Hasta los reactores más comunes, los refrigerados por agua, ofrecen un nuevo aspecto de cara al futuro. Con la intención de evitar que haya accidentes por pérdida del refrigerante, como el ocurrido en Three Mile Island, y de simplificar la planta en su totalidad se ha ideado una nueva serie de sistemas de Generación IV en los que todos los componentes primarios se alojan en una sola vasija. Un diseño estadounidense de este género es la denominada “concepción innovadora y segura de un reactor internacional”, o IRIS.

Como el sistema de refrigeración de IRIS va encerrado en una vasija que resiste altas presiones sin sufrir daños, su sistema primario no sufriría una pérdida notable de refrigerante aunque fallase una de las grandes tuberías. Dado que la vasija resistente a la presión no permite la fuga de fluidos, cualquier accidente posible se limitará a una pérdida de presión mucho más moderada que en los diseños anteriores.

CICLOS DE COMBUSTIBLE NUCLEAR ABIERTOS Y CERRADOS

El ciclo “una sola vez cada paso” o abierto (*en verde*) toma el mineral de uranio, lo transforma en combustible fisible, lo quema una vez en el reactor y luego lo encierra en un depósito geológico. Este método, seguido en EE.UU., aprovecha sólo el uno por ciento del contenido de energía del uranio. En el ciclo cerrado (*en blanco*), el combustible gastado se procesa para recuperar el contenido todavía utilizable de uranio y plutonio; se hace así en Francia, Japón y el Reino Unido. En el futuro, los ciclos cerrados basados en reactores de espectro rápido podrían recuperar otros actínidos que actualmente se desechan.



Para lograr una configuración tan compacta se han introducido en los reactores varias simplificaciones importantes. Se han apilado los subsistemas en el interior de la vasija para permitir la transferencia pasiva del calor por circulación natural durante los accidentes. Además, los accionadores de las barras de control también van dentro de la vasija, lo que elimina el riesgo de que salgan lanzados del núcleo. Estos reactores pueden construirse como módulos de pequeña potencia, de instalación más flexible y económica.

Los diseñadores exploran asimismo las posibilidades de hacer que las plantas funcionen a temperatura y presión elevadas, en concreto a más de 374 grados y 221 atmósferas, es decir, por encima del denominado punto crítico del agua, donde se borra la distinción entre líquido y vapor. Más allá de ese punto el agua se comporta como un fluido continuo de excepcional calor específico (capacidad de almacenamiento térmico) y unas propiedades superiores en lo que se refiere a la transferencia del calor (conductividad térmica). Tampoco hierve al calentarse, ni se convierte violentamente en vapor si se despresuriza rápidamente. La ventaja primordial de funcionar por encima del punto crítico es que el rendimiento térmico del sistema puede elevarse hasta el 45 por ciento; se aproxima así al régimen de alta temperatura en el que sería viable la producción de combustible de hidrógeno.

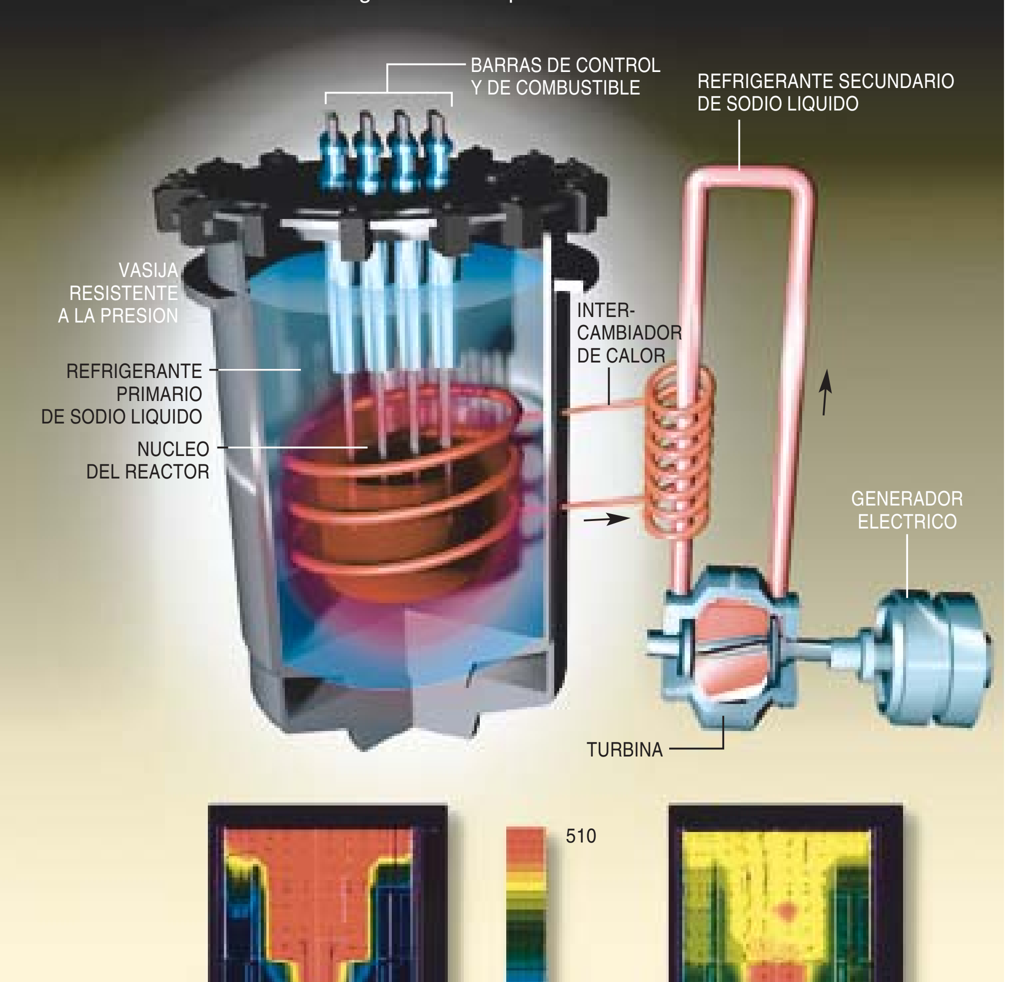
Por mucho que a primera vista se asemejen los reactores basados en agua supercrítica a los de la Generación II, las diferencias abundan. Por ejemplo, los núcleos de los primeros son considerablemente más pequeños, con lo que se economiza en la vasija resistente a la presión y los dispositivos circundantes. Además, el equipo de ciclo de vapor asociado se simplifica sustancialmente porque trabaja con un fluido de una sola fase. A esto se añade que el menor tamaño del núcleo y la baja densidad del refrigerante reducen el volumen de agua que ha de mantenerse dentro del recipiente de contención en caso de accidente. Dado que el refrigerante de baja densidad no modera la energía de los neutrones, con él cabe pensar en diseños de reactores de espectro rápido, que tienen la ventaja de su viabilidad a largo plazo intrínseca. El principal inconveniente de los sistemas de agua supercrítica es que el refrigerante se hace cada vez más corrosivo; por lo tanto, habría que desarrollar nuevos materiales y métodos para controlar la corrosión y la erosión. En Canadá, Corea del Sur, EE.UU., Francia y Japón prosigue la investigación de estos sistemas de agua supercrítica.

Reactores de espectro rápido

Un tipo de diseño para un plazo más largo es el reactor de espectro rápido (o de neutrones de

REACTOR NUCLEAR DE ESPECTRO RAPIDO

Los reactores de espectro rápido, como el Super PRISM de General Electric (*ilustración estilizada*), que producen neutrones rápidos (de alta energía), suelen refrigerarse con metales fundidos. En los reactores nodriza esos neutrones de alta energía se utilizan para crear nuevo combustible nuclear.



PASADOS 4 MINUTOS

ESCALA DE TEMPERATURAS (EN GRADOS CELSIUS)

PASADOS 20 MINUTOS

ENFRIAMIENTO PASIVO DEL NUCLEO

Estas distribuciones de temperatura ilustran la reducción pasiva de la temperatura del núcleo del reactor por irradiación al exterior tras la pérdida accidental del foco frío externo.

alta energía), otro sistema de la Generación IV. Equipos de Corea del Sur, Francia, Japón, Rusia y otras naciones trabajan en el diseño de un ejemplo de este tipo de reactor.

La mayoría de los reactores nucleares presentan un espectro de emisión de neutrones térmico, es decir, de energía más bien baja. En un reactor térmico los neutrones rápidos (de alta energía) generados en la reacción de fisión se desaceleran hasta un nivel "térmico" de energía al colisionar con el hidrógeno en el agua o con otros núclidos ligeros. Aunque estos reactores den buenos resultados en la generación de electricidad, no rinden mucho como productores de combustible nuclear (es decir, como reactores nodriza), ni en el reciclado de éste.

Casi todos los reactores de espectro rápido construidos hasta la fecha emplean sodio líquido por refrigerante. Las versiones futuras de este tipo de reactores podrían utilizar sodio, plomo, una aleación de plomo y bismuto o gases inertes como el helio o el dióxido de carbono. La mayor energía de los neutrones de un reactor rápido puede servir para producir nuevo combustible o para destruir el plutonio procedente de las armas desmanteladas y los residuos de larga actividad de los reactores térmicos. Gracias a ese reciclado del combustible, los reactores rápidos obtienen del uranio mucha más energía, y el volumen de residuos que a la larga ha de evacuarse se reduce. Estos reactores nodriza son una de las claves para elevar la viabilidad a largo plazo de los futuros sistemas de energía nuclear, sobre todo si se quiere usar mucho más ésta en el futuro.

Además de ser compatibles con un espectro de neutrones rápidos, los refrigerantes metálicos poseen varias cualidades atractivas. Primero, gracias a las excepcionales propiedades de transferencia de calor que confieren a los reactores pueden éstos resistir accidentes como los de Three Mile Island y Chernobyl. Segundo, algunos metales líquidos (aunque no todos) causan en los componentes mucha menos corrosión que el agua, lo que prolonga la vida activa de la vasija del reactor y de otros subsistemas críticos. Por último, estos sistemas de alta temperatura pueden funcionar a una presión cercana a la atmosférica; se simplifica así notablemente el diseño y se reduce el riesgo industrial en la planta.

En el mundo entero funcionan más de una docena de reactores refrigerados por sodio. Esta experiencia ha descubierto dos principales dificultades que arrostrar. En primer lugar, el sodio reacciona con el agua desprendiendo mucho calor, posible causa de accidentes. Por tal motivo se ha incluido en el diseño de esos reactores un sistema de sodio secundario que aísla

¿ESTAN LAS CENTRALES NUCLEARES A SALVO DE LOS TERRORISTAS?

Los trágicos sucesos del 11 de septiembre de 2001 plantean inquietantes dudas acerca de la vulnerabilidad de las instalaciones nucleares ante ataques terroristas. Aunque se hayan adoptado rigurosas medidas de seguridad civil y militar con la intención de impedir determinadas agresiones, ensombrece el ánimo imaginar el impacto deliberado de una gran aeronave comercial. ¿Nos debe preocupar tal contingencia? La respuesta es sí y no.

Una central nuclear no es objetivo fácil para un avión de línea que vuela a alta velocidad. Un edificio de contención cilíndrico coronado por una cúpula no sufrirá demasiado si el avión no le da de lleno. Por lo común, el propio núcleo del reactor, que está situado al nivel o por debajo del suelo, mide menos de 3 metros de diámetro y 4 de altura y está encerrado en una gruesa vasija de acero rodeada a su vez por un búnker de hormigón. Los diseños de las estructuras de contención del reactor varían en los detalles, pero en todos los casos están concebidas para resistir las fuerzas más devastadoras de la naturaleza (terremotos, tornados y huracanes). Pese a no estar diseñadas para resistir acciones bélicas pueden aguantar el impacto de un avión pequeño.

Aun estando protegido el núcleo del reactor, una parte de las conducciones y del equipo de refrigeración, las instalaciones auxiliares y la contigua área de distribución de la electricidad sí podrían ser vulnerables en un ataque directo. Las centrales de energía nuclear, sin embargo, disponen de múltiples sistemas de emergencia, tanto de refrigeración como, por si fallase el suministro eléctrico, de generación de energía. En el caso improbable de que se destruyeran todas estas salvaguardas el núcleo del reactor podría sobrecalentarse y fundirse. Pero incluso en una situación tan extrema, similar a la ocurrida en Three Mile Island, los materiales radiactivos del núcleo seguirían confinados en la vasija resistente a la presión.



UN SOLDADO FRANCES monta guardia ante una batería de misiles antiaéreos cerca de la mayor planta europea de reprocesado de residuos, la de La Hague, en Normandía.

El talón de Aquiles de las centrales nucleares ha de buscarse en las instalaciones de almacenamiento transitorio del combustible nuclear consumido. Aunque habitualmente contienen varios grupos de combustible ya utilizados, y por tanto más radiactividad total que el propio reactor, muchos de los isótopos radiactivos más peligrosos del viejo combustible ya se han desintegrado. Esto sobre todo sucede con los productos gaseosos de la fisión susceptibles de pasar a la atmósfera, cuyos períodos de semidesintegración se miden en meses. Los grupos de combustible consumidos que llevan relativamente poco tiempo fuera del reactor se guardan en profundos estanques de agua, para enfriarlos y detener la radiación que emiten. Esos estanques abiertos al aire están rodeados por recintos de gruesas paredes de hormigón revestidas de acero. Al cabo de unos pocos años los materiales se transfieren a bidones donde se los almacena en seco y refrigera con aire.

Aunque los estanques de enfriamiento constituyen un blanco bastante pequeño y por tanto difícil de alcanzar para los terroristas, un ataque preciso podría secar uno y provocar el sobrecalentamiento y fusión del combustible que contenga. Los expertos sostienen que bastaría una manguera de riego normal para rellenar el estanque. Incluso si el combustible llegara a fundirse, opinan que se producirían pocas partículas radiactivas que pudiera transportar el aire. Si se estrellara una aeronave contra los bidones de almacenamiento de combustible en seco seguramente sólo los dispersaría. Pero en el caso de que alguno se rajara, los fragmentos rotos del revestimiento oxidado del combustible podrían llevar alguna radiactividad a los cielos.

—La redacción

el refrigerante primario, el que se aplica al núcleo del reactor, del agua del sistema generador de energía eléctrica. Algunos diseños nuevos se centran en novedosas técnicas de intercambio de calor que protegen de las fugas.

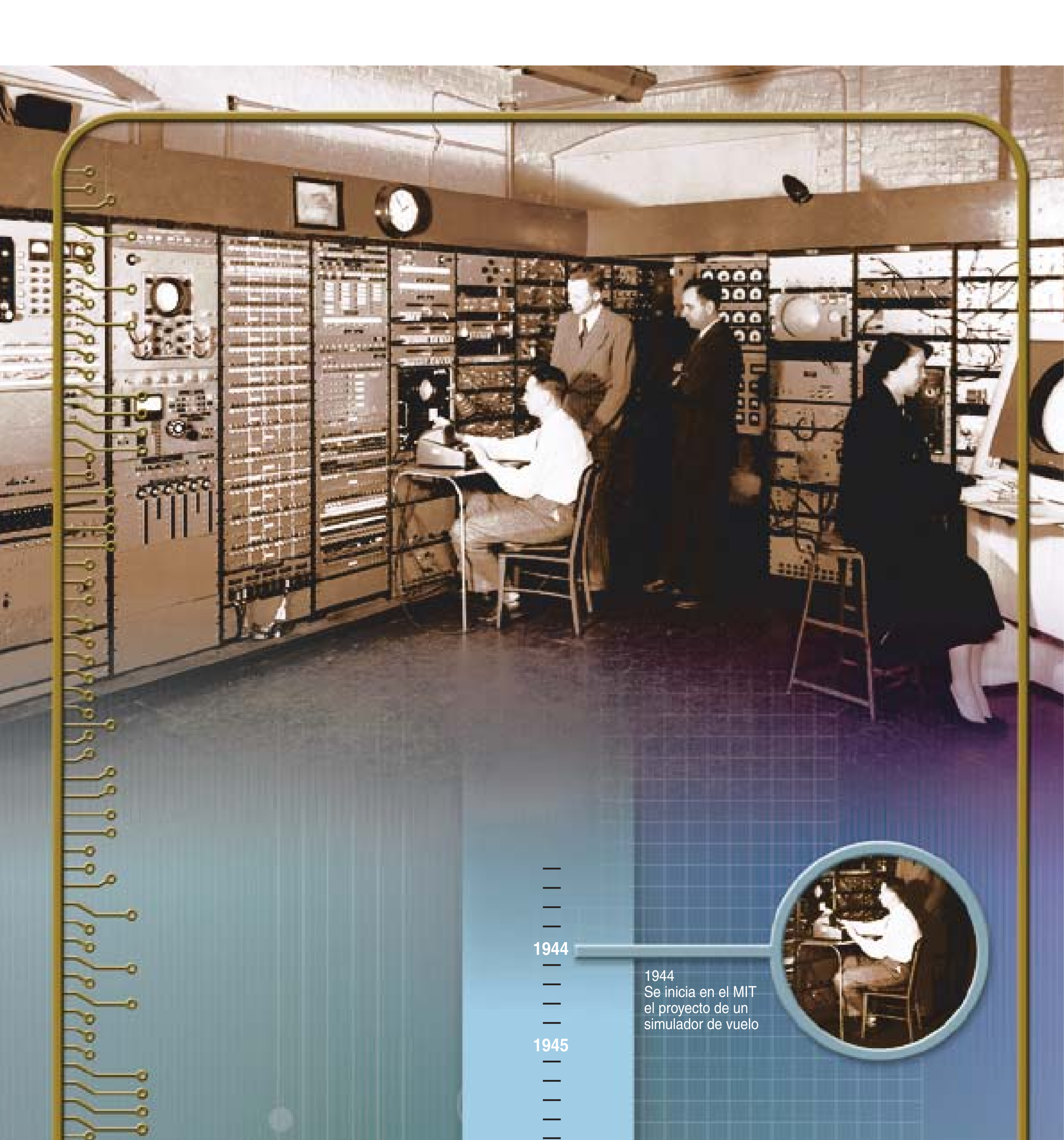
El segundo obstáculo a superar atañe a la economía. Los reactores refrigerados por sodio requieren dos etapas de transferencia de calor entre el núcleo y la turbina, lo que eleva los costes de capital y hace disminuir los rendimientos térmicos con respecto a los conseguidos con las refrigeraciones por gas y por agua más avanzadas (cerca del 38 por ciento en un moderno reactor refrigerado por sodio y un 45 por ciento en un reactor de agua supercrítico). Además, los metales líquidos son opacos, lo que dificulta la inspección y el mantenimiento de los componentes.

Los diseños de reactores de espectro rápido de la próxima generación intentan aprovechar las ventajas de las configuraciones anteriores, al tiempo que atenúan sus inconvenientes. La técnica ha avanzado hasta un punto en el que es posible imaginar reactores de espectro rápido en los que habrá, creen los ingenieros, muy pocas posibilidades de que se funda el núcleo. Además, los refrigerantes no reactivos, como los gases inertes, el plomo o las aleaciones de plomo o de plomo y bismuto, pueden hacer innecesaria la refrigeración secundaria, favoreciendo así la viabilidad económica inmediata de estos sistemas.

Bibliografía complementaria

NUCLEAR ENERGY IN A SUSTAINABLE DEVELOPMENT PERSPECTIVE. Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), Agencia de Energía Nuclear, París, 2000.

Los orígenes de la



informática personal

M. Mitchell Waldrop



Ni Gates, ni Jobs, ni Wozniak. Los cimientos de los modernos ordenadores interactivos se echaron decenios antes

Según la leyenda al uso, hace poco más de un cuarto de siglo un grupo de jóvenes con talento, que se apellidaban Gates, Jobs o Wozniak, se pusieron a trastear con los recién aparecidos microprocesadores en los garajes de sus casas o en los cuartos de su residencia universitaria, y acabaron siendo, casi por casualidad, precursores de la revolución que la informática personal ha producido.

Pero la realidad histórica es muy otra. Después de todo, lo que puso en ignición a la llamada revolución informática (y la de Internet, tras ella) no fueron, intrínsecamente, ni los nuevos materiales, ni los programas, sino el mensaje que tomó cuerpo en tales productos. Consistía tal mensaje en que los ordenadores no tenían por qué ser máquinas enormes y amedrentadoras, aposentadas en estancias apartadas, dedicadas a procesar tarjetas perforadas para alguna macroinstitución. Podían, por el contrario, ser máquinas de escala humana, instaladas en nuestra intimidad, capaces de responder y ayudarnos en cuanto personas. Los ordenadores podían reforzar la creatividad del hombre, dar a todos acceso a la información, apadrinar comunidades mayores y erigir una nueva lonja global para las comunicaciones, la industria y el comercio. Los ordenadores, en breve, podían ser instrumentos de potenciación individual. Resulta curioso que los cimientos de tal visión se hubieran puesto más de treinta años antes, por el mismo gobierno y el mismo aparato institucional que tantos recelos suscitaron en la generación de los años setenta.

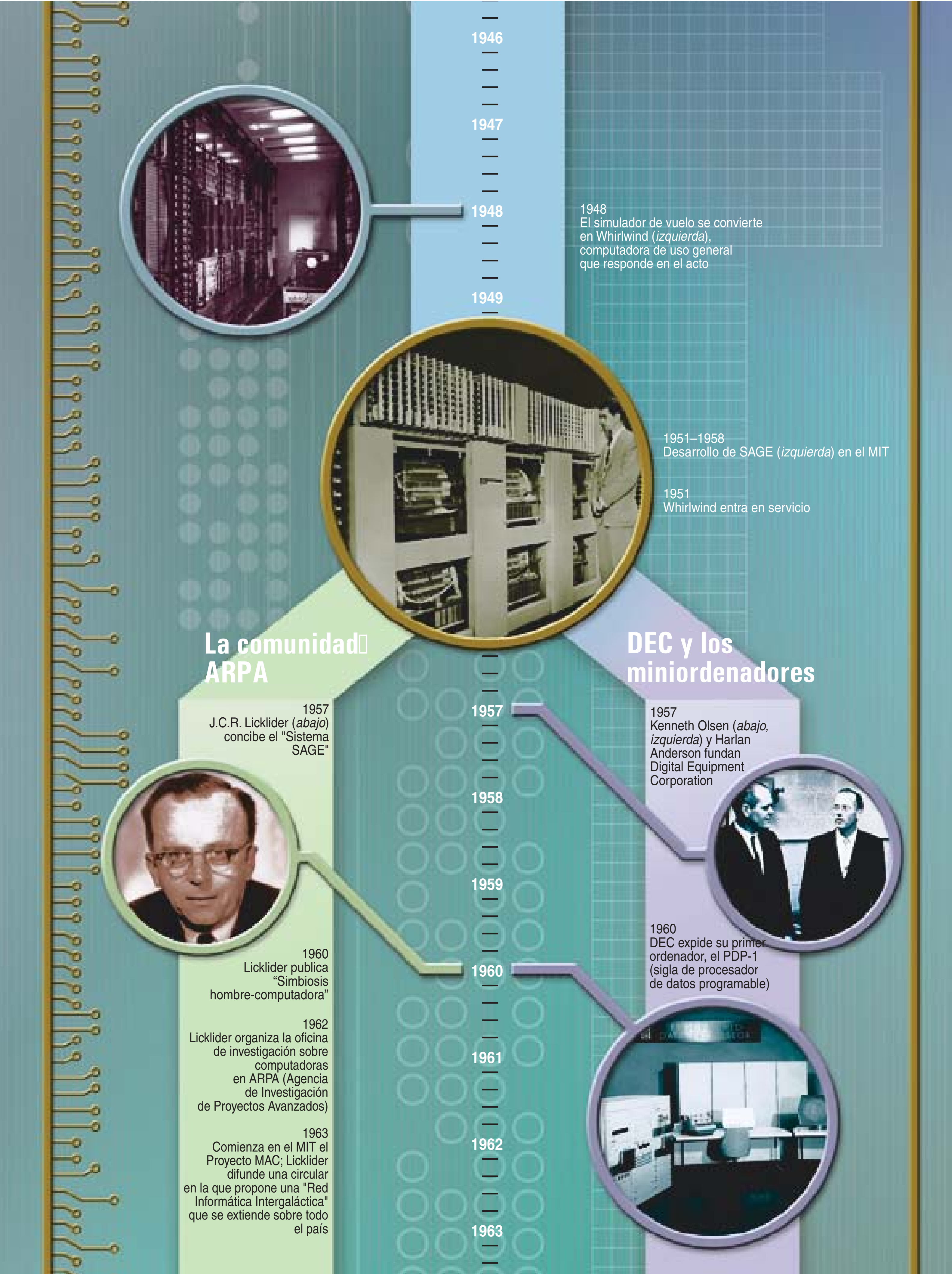
Respuesta inmediata

La informática personal, cual hoy la conocemos, sería inconcebible sin la noción, mucho más fundamental, de computación *interactiva*: la exigencia de que la respuesta de la máquina a las acciones del usuario ha de producirse al momento, en vez de tardar varias horas y llegar en forma de pliegos de papel impreso.

Tal idea no era en absoluto evidente en los primeros tiempos; no lo era, desde luego, cuando los ordenadores apenas eran tenidos por poco más que calculadoras ultrarrápidas. Desde las primeras computadoras totalmente electrónicas desarrolladas en las postrimerías de la Segunda Guerra Mundial hasta la primera oleada de informatización de las grandes empresas, entre 1960 y 1965, prácticamente todos los ordenadores en existencia estaban diseñados para ir triturando un determinado problema hasta emitir una solución, para después, lo mismo que una calculadora de sobremesa, quedar a la espera de un nuevo problema.

Pero ya en los orígenes hubo, sin embargo, una excepción a esta regla: la máquina Whirlwind ("torbellino"), una computadora experimental desarrollada en el Instituto de Tecnología de Massachusetts con financiación de la Marina de los EE.UU. Es de señalar que el proyecto Whirlwind había dado comienzo en 1944 con fines bélicos; su objetivo no era construir una calculadora, sino un simulador de vuelo enteramente electrónico, una máquina que no buscaba una "solución", sino una secuencia cambiante sin cesar de acciones del piloto y de respuestas simuladas del aeroplano. El grupo, dirigido por Forrester, se percató enseguida de que la computadora que debían construir para controlar al simulador tendría que ser interactiva desde los cimientos, capaz de responder a los acontecimientos tan velozmente como se produjeran. Es decir, tendría que haber sido el primer ordenador del mundo que funcionase en "tiempo real".

Forrester y su equipo previeron también que la computación interactiva, en tiempo real, podría ser mucho más importante que el propio simulador de


1946
1947
1948
1948
El simulador de vuelo se convierte en Whirlwind (*izquierda*), computadora de uso general que responde en el acto
1949
1951–1958
Desarrollo de SAGE (*izquierda*) en el MIT
1951
Whirlwind entra en servicio
La comunidad ARPA
DEC y los miniordenadores
1957
J.C.R. Licklider (*abajo*) concibe el "Sistema SAGE"
1957
1957
Kenneth Olsen (*abajo, izquierda*) y Harlan Anderson fundan Digital Equipment Corporation
1958
1959
1960
DEC expide su primer ordenador, el PDP-1 (sigla de procesador de datos programable)
1960
1960
Licklider publica “Simbiosis hombre-computadora”
1961
1962
Licklider organiza la oficina de investigación sobre computadoras en ARPA (Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados)
1962
1963
Comienza en el MIT el Proyecto MAC; Licklider difunde una circular en la que propone una "Red Informática Intergaláctica" que se extiende sobre todo el país
1963

vuelo; sus hipotéticas aplicaciones iban desde la logística y la coordinación de las fuerzas navales en sus misiones, hasta la defensa contra misiles balísticos, o el control de tráfico aéreo. Por esta razón, en 1948 los investigadores lograron convencer a la Marina para llevar más lejos el proyecto Whirlwind, convirtiéndolo en demostración de la computación interactiva y en tiempo real, dotado de una financiación de 1 millón de dólares al año, la mayor, con mucho, y más onerosa, iniciativa informática de su tiempo.

El tamaño de la máquina no desmerecía. Cuando Whirlwind entró por fin en servicio, en 1951, sus ocho altos armarios electrónicos, construidos con válvulas termoiónicas, ocupaban el espacio de una vivienda familiar, con sitio suficiente para que los investigadores pudieran circular por su interior. No menos impresionante era su rendimiento, equivalente, más o menos, al de un ordenador personal de principios de los ochenta, como el TRS-80. En verdad, la máquina Whirlwind fue la primera en ser utilizada como ordenador personal: los individuos podían pedir turno para utilizarlo en sesiones de 15 minutos, durante los cuales podían sentarse ante la pantalla de rayos catódicos, confeccionar programas, ejecutar simulaciones o, sencillamente, jugar un poco.

Pero llegados aquí, la Marina, harta de financiar la Whirlwind, estaba amenazando con echarle el cierre. Lo que salvó al proyecto —y con él, el futuro de la computación interactiva— fue el primer ensayo nuclear de la Unión Soviética en 1949, que alzó el espectro de un ataque comunista por sorpresa mediante bombarderos de largo alcance. En consecuencia, en 1951, la Fuerza Aérea encargó al MIT el diseño de un sistema de alerta inmediata, nuevo y tan perfecto como fuera técnicamente posible, en el cual un sistema de computadoras de respuesta inmediata, basadas en el diseño Whirlwind, se encargasen de la coordinación de la vigilancia por radar, el seguimiento de objetivos y todas las demás operaciones. El 20 de abril de 1951, Whirlwind demos-



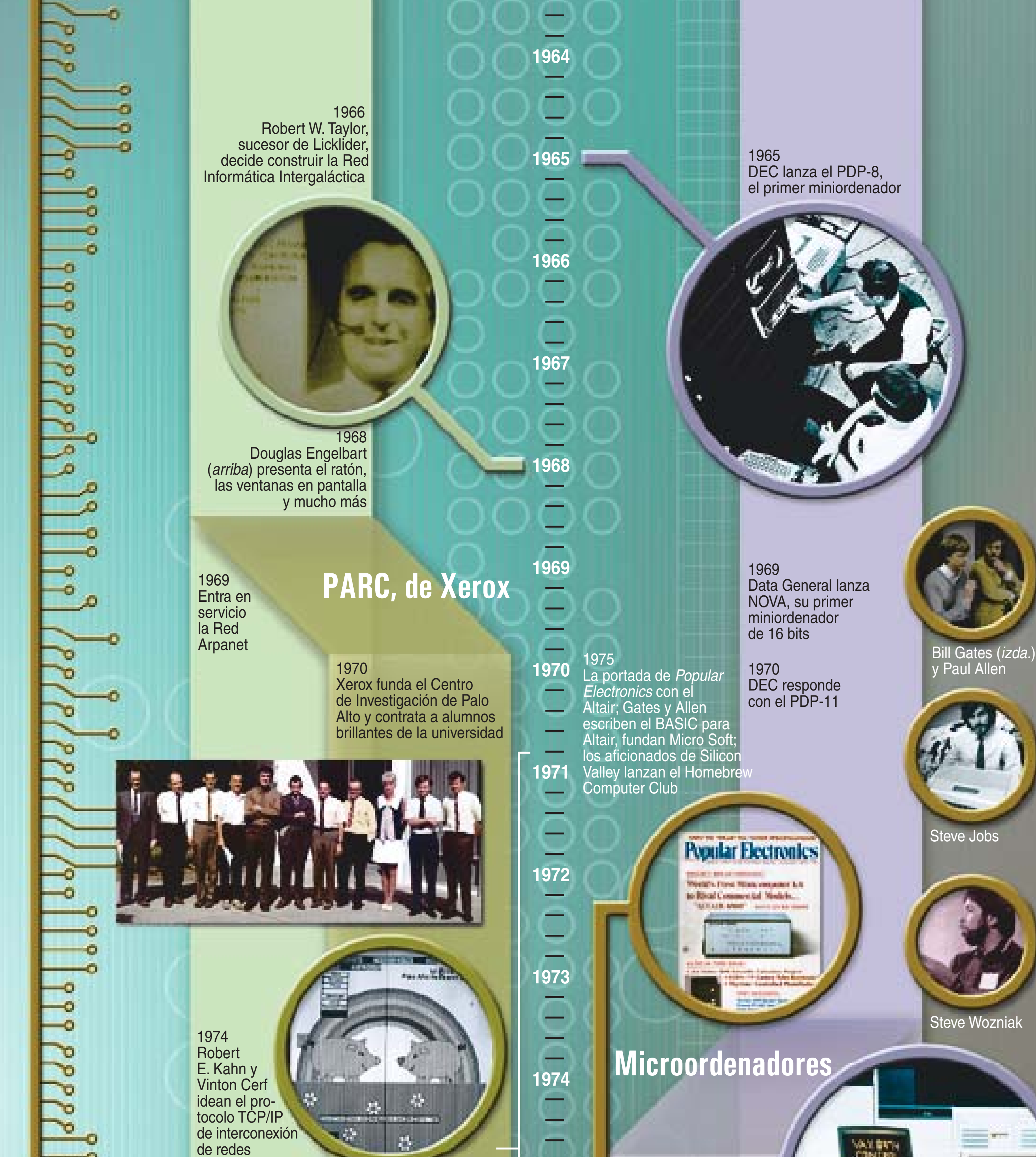
tró que la idea era factible, pues logró seguir por los cielos de Massachusetts las trayectorias de tres aviones de hélice a partir de los datos enviados por los radares, y computar las trayectorias de interceptación que guiarían a un "caza defensor" hasta menos de 1000 metros de los "atacantes". La máquina se convirtió al poco en la pieza clave de un programa de desarrollo a plena escala, el denominado Proyecto Lincoln.

Tras millones de dólares y más de cinco años, el resultado fue SAGE (acrónimo de "Semi-Automatic Ground Environment"): un sistema terrestre semiautomático que abarcaba el continente norteamericano y que contaba con 23 centros de dirección, dotado cada uno con unos 50 operadores, más otras dos computadoras redundantes, que funcionaban en tiempo real, y capaces del seguimiento simultáneo de hasta 400 aviones. Dado que SAGE no llegó nunca a un escenario de combate, su eficacia militar es debatible. (El sistema quedó fuera de servicio en 1984.) No cabe duda, en cambio, de su impacto en la historia de la informática.

En primer lugar, contribuyó a la creación del Valle del Silicio en el este de los EE.UU. En 1952, el Proyecto Lincoln recibió nueva denominación —Laboratorio Lincoln—, y se le asignó una nueva sede en Lexington, en los aledaños de Boston. Pronto llegaron otras organizaciones de técnicas punteras. En segundo lugar, SAGE fue el canal de conducción que transportaba hasta el mundo comercial las técnicas de Whirlwind. Por ejemplo, a finales de los años cincuenta, IBM estaba valiéndose de su experiencia como contratista principal de los ordenadores SAGE para crear un sistema de reserva y venta de billetes, que cubría todos los EE.UU., para American Airlines. El sistema entró en servicio en 1964 con el nombre de SABRE (de "Semi-Automatic Business-Related Environment"). Ese entorno semiautomático con fines comerciales se tomaría por modelo en todos los sistemas posteriores de transacciones en "punto de venta". Análogamente, IBM fue, en 1955, el primer fabricante que lanzó al mercado un ordenador comercial provisto de memorias de núcleos magnéticos, mucho más económicas y fiables que cualesquiera otros métodos anteriores de almacenamiento de datos binarios. La memoria basada en núcleos tóricos magnéticos sería la forma dominante en la industria a lo largo de los dos decenios siguientes, y no cedió ante las memorias de chips de semiconductores hasta mediados de los años setenta.

Tal vez lo más relevante para esta historia sea que SAGE produjo una consola estándar para el operador, que acabaría evolucionando hasta el moderno ambiente de computación de escritorio. Cada consola de operador de radar contaba con una pantalla de rayos catódicos, un teclado y un dispositivo manual que permitía al operador seleccionar distintos elementos en la pantalla (se trataba de una pistola lumínica, no de un ratón, pero funcionaba de modo parecido). En el trasfondo, por otra parte, los ordenadores de los 23 centros de dirección estaban concatenados por una red digital de larga distancia, que operaba a través de las líneas telefónicas. De hecho, para poder transmitir señales digitales a través de líneas concebidas para señales analógicas, los ingenieros de SAGE tuvieron que desarrollar otro artilugio hoy familiar: el módem.

Como es obvio, la senda que lleva desde SAGE hasta el moderno ordenador personal mal puede ir en línea recta. Dos parecen ser las líneas de desarrollo, en paralelo; centrada, una, en los materiales y equipos, y la otra, en la forma en que las personas los utilizaban.



1966
Robert W. Taylor, sucesor de Licklider, decide construir la Red Informática Intergaláctica

1968
Douglas Engelbart (*arriba*) presenta el ratón, las ventanas en pantalla y mucho más

PARC, de Xerox

1969
Entra en servicio la Red Arpanet

1970
Xerox funda el Centro de Investigación de Palo Alto y contrata a alumnos brillantes de la universidad

1974
Robert E. Kahn y Vinton Cerf idean el protocolo TCP/IP de interconexión de redes

1976
Cerf (*abajo*) llega a jefe de interconexión en ARPA; comienza la migración a TCP/IP

1971–1977
PARC crea el entorno de computación de sobremesa: ordenador personal autónomo; interfaz gráfica (*arriba*) con ventanas, iconos, menús y ratón; trabajo en red local Ethernet; impresoras láser; procesamiento de textos hablados; y más

1965
DEC lanza el PDP-8, el primer miniordenador

1969
Data General lanza NOVA, su primer miniordenador de 16 bits

1970
DEC responde con el PDP-11

Bill Gates (*izda.*) y Paul Allen

Steve Jobs

Steve Wozniak

1975
La portada de *Popular Electronics* con el Altair; Gates y Allen escriben el BASIC para Altair, fundan Micro Soft; los aficionados de Silicon Valley lanzan el Homebrew Computer Club

Microordenadores

1976
Steve Jobs y Steve Wozniak fundan Apple Computer Company; Gary Kildall anuncia CP/M, uno de los primeros sistemas operativos para microordenadores

1977
Primeros micros para público general, como Apple II y TRS-80

1977
DEC anuncia el VAX, el primer miniordenador de 32-bits

Equipos modificables

La evolución del material arrancó de aquellos intervalos de 15 minutos destinados al uso personal de Whirlwind y de las otras máquinas desarrolladas para el proyecto SAGE. Tal uso de las máquinas había hecho nacer en algunos de los jóvenes del proyecto la idea de que los ordenadores deberían ser igual de entretenidos para todo el mundo. Y así, en 1957, dos de ellos, Kenneth Olsen y Harlan Anderson, fundaron una pequeña compañía para llevar al mercado tales computadoras interactivas. La llamaron DEC: Digital Equipment Corporation.

La acogida inicial del mercado fue tibia. Cuando DEC introdujo su primer procesador de datos programable, el PDP-1, en 1960, la compañía solamente pudo colocar 49 unidades, un número respetable, aunque nada espectacular. No obstante, entre científicos e ingenieros, el PDP-1 fue un exitazo. La máquina era totalmente interactiva, llevaba incorporada una pantalla CRT, cabía en un cuartito pequeño y suministraba una considerable potencia de cálculo, habida cuenta de que costaba sólo 120.000 dólares. Y lo que era todavía más impresionante, la PDP-1 era una máquina "abierta": todos los detalles del equipo se hicieron públicos. Gracias a ello, los usuarios con preparación técnica podían modificar su máquina o ampliarla en la forma que quisieran. No se abstuvieron de hacerlo.

En 1964, el entusiasmo de los usuarios por el PDP-1, y los éxitos de la compañía con otros productos, indujeron a DEC a emprender el desarrollo de un ordenador "de sobremesa", concebido para grupos pequeños, para individuos incluso. Gran parte del diseño estuvo basado en LINC, una computadora experimental de laboratorio desarrollada en el Laboratorio Lincoln por Wesley Clark, antiguo compañero de Olsen y Anderson, que se había trasladado con su equipo a la Universidad de Washington. Pero la inspiración llegó también de los rápidos progresos que se estaban haciendo en las técnicas de semiconductores y de almacenamiento



de datos, por no mencionar las técnicas de manufactura en la cadena de montaje.

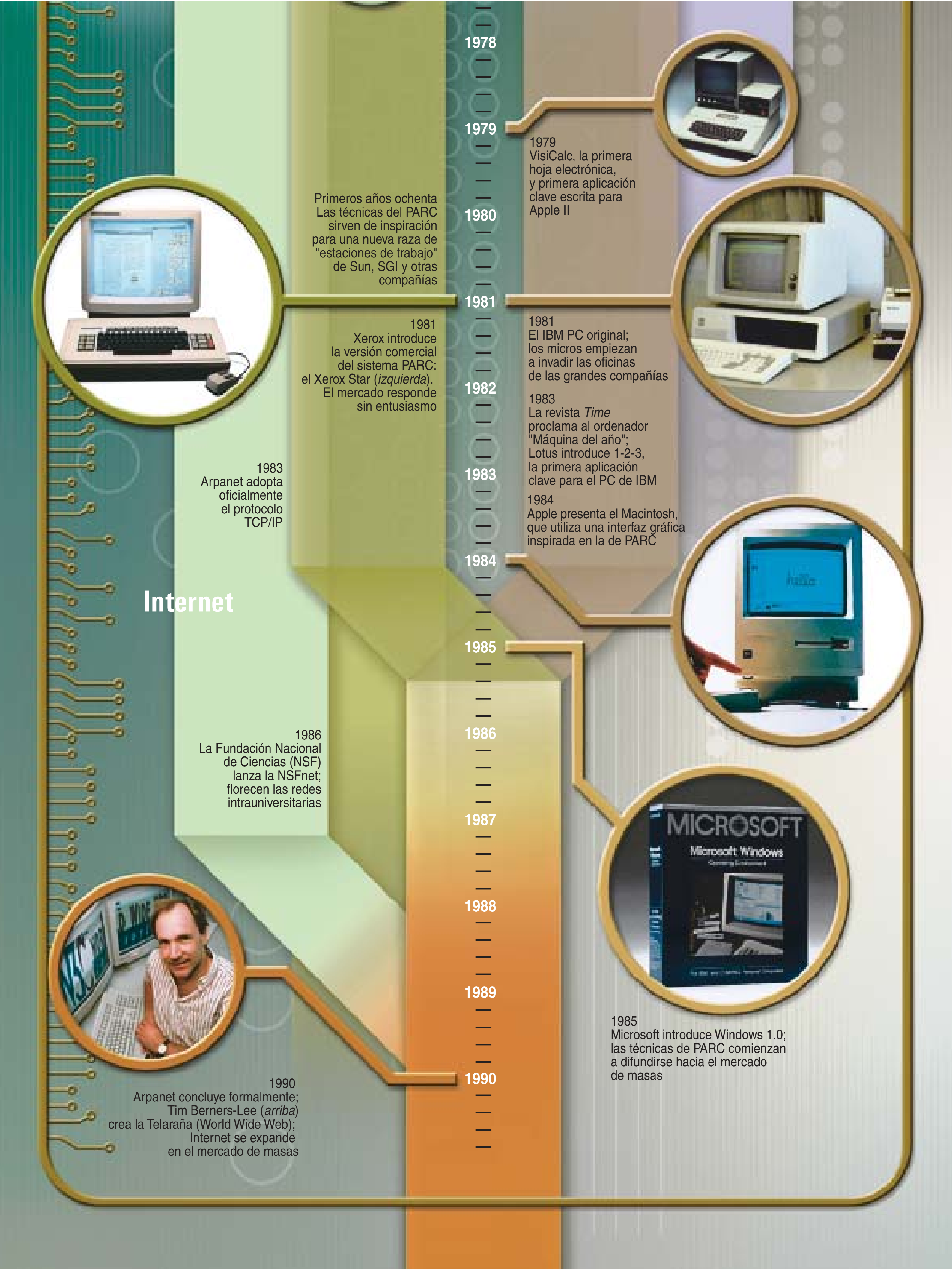
El resultado fue el PDP-8, un ordenador increíblemente pequeño y ligero, atractivo; pesaba sólo unos 110 kilos y costaba 18.000 dólares. Incluso a los usuarios sin preparación técnica les encantaba contar con un ordenador que podían manipular. La máquina salió al mercado en abril de 1965 y no tardó en ser vista en plantas químicas, periódicos, laboratorios, refinerías y colegios.

Con docenas de competidores lanzados a ofrecer máquinas similares, pronto resultó evidente que el PDP-8 era el prototipo para una generación del todo nueva de miniordenadores —nombre que fue acuñado en la oficina de DEC en Londres, inspirado, al parecer, por un nuevo elemento de la moda femenina: la minifalda. Además, a mediados de los años setenta, a la vez que la competencia producía fuertes oleadas de miniordenadores basados en las técnicas de semiconductores, cada vez más perfectas, DEC y sus rivales habían empezado a efectuar incursiones serias en el mercado de los grandes ordenadores al estilo de los IBM.

Los aficionados a la electrónica se habían sentido también intrigados por la expectativa de poder manipular por su cuenta en un ordenador. Muchos de ellos habían tenido contacto con miniordenadores, en el trabajo o en la universidad, y ahora deseaban tener uno con el que trastear en casa por su cuenta. El número de la revista *Popular Electronics* que es hoy famoso llegó a los kioscos de prensa en enero de 1975. En la portada se veía una caja de color azul pálido con una hilera de conmutadores y diodos en el frontal y un rótulo en el ángulo superior izquierdo: Altair 8800. Los titulares proclamaban: "El primer miniordenador en kit del mundo, capaz de rivalizar con modelos comerciales".

En el interior de la revista, los lectores eran informados de que el conjunto de piezas para ensamblar, que costaba 397 dólares, podía ser encargado a MITS, una empresa dedicada a equipos despiezados para ensamblar, con sede en la neomexicana Albuquerque, y que estaba basado en el Intel 8080, un microprocesador que albergaba en un solo microcircuito a toda la unidad central de procesamiento, o CPU. (Los miniordenadores al uso tenían CPU compuestas por varios microcircuitos o incluso por montajes de varias tarjetas circuitales.) En la jerga moderna, esa propiedad hacía que el Altair fuera un *microordenador*. De hecho, resultó ser el primer microordenador que disfrutó de éxito comercial. Pero, como afirmaba el titular de *Popular Electronics*, el Altair había sido concebido, ya desde el principio, como miniordenador. Tenía el aspecto de un mini. Tenía la arquitectura abierta de un mini. Y podía usar los mismos periféricos que un mini. Si se hacía abstracción del chip 8080, el Altair *era* un miniordenador.

La propia elección posterior de un lenguaje oficial de programación hecha por MITS era reminiscencia de los minis. Tal lenguaje fue creado, en la primavera de 1975, por dos naturales de Seattle, inspirados por el artículo de *Popular Electronics* —Bill Gates, alumno de Harvard, y un ex compañero de instituto, Paul Allen, que trabajaba de programador en las afueras de Boston—; el BASIC de Altair tomaba cierto número de características esenciales del BASIC preparado por DEC para el PDP-11. (Cuando el lenguaje estuvo listo, Allen dejó su empleo, Gates abandonó los estudios, se fueron a Albuquerque para


1978
1979
1979
VisiCalc, la primera
hoja electrónica,
y primera aplicación
clave escrita para
Apple II
Primeros años ochenta
Las técnicas del PARC
sirven de inspiración
para una nueva raza de
"estaciones de trabajo"
de Sun, SGI y otras
compañías
1980
1981
1981
Xerox introduce
la versión comercial
del sistema PARC:
el Xerox Star (izquierda).
El mercado responde
sin entusiasmo
1981
El IBM PC original;
los micros empiezan
a invadir las oficinas
de las grandes compañías
1982
1983
La revista Time
proclama al ordenador
"Máquina del año";
Lotus introduce 1-2-3,
la primera aplicación
clave para el PC de IBM
1983
1983
Arpanet adopta
oficialmente
el protocolo
TCP/IP
1984
Apple presenta el Macintosh,
que utiliza una interfaz gráfica
inspirada en la de PARC
1984
Internet
1985
1986
1986
La Fundación Nacional
de Ciencias (NSF)
lanza la NSFnet;
florecen las redes
intrauniversitarias
1987
MICROSOFT
Microsoft Windows
1988
1989
1990
1985
Microsoft introduce Windows 1.0;
las técnicas de PARC comienzan
a difundirse hacia el mercado
de masas
1990
Arpanet concluye formalmente;
Tim Berners-Lee (arriba)
crea la Telaraña (World Wide Web);
Internet se expande
en el mercado de masas

estar cerca de MITS y, para comercializarlo, fundaron entre ambos una pequeña compañía, llamada Micro Soft.)

El Altair fue un éxito clamoroso en el mundo de los aficionados; se vendieron más de 10.000 unidades. Inspiró la formación de muchos grupos de usuarios, entre ellos, el legendario Homebrew Computer Club, cuya primera reunión se celebró en un garaje de Palo Alto, en California, en marzo de 1975.

Y en el plazo de uno o dos años, mientras surgían docenas de microcomputadores rivales, unos pocos jóvenes emprendedores habían empezado a pensar en introducir sus máquinas en el mercado de consumo. Evidentemente, ello suponía ofrecer no un juego de piezas y plantillas, sino algo más cercano a un electrodoméstico y que funcionase nada más conectarlo. Fueron varias las empresas que afrontaron el reto, de ellas, la más memorable, Apple Computer Company, fundada en 1976 por Steve Wozniak y Steve Jobs, miembros del Homebrew Computer Club los dos. Amigos de siempre, procedían de la ciudad de Cupertino. Su máquina Apple II, presentada en abril de 1977, contaba con un teclado integrado en una carcasa beige de diseño profesional. Costaba solamente 1195 dólares sin el monitor. Y lo mejor de todo, era fantástico para los videojuegos.

Al concluir el decenio, Apple se había convertido en la compañía de crecimiento más rápido de que se tenga noticia. El resto es historia contemporánea, aunque una historia que vino condicionada por la segunda línea de desarrollo del proyecto SAGE.

La simbiosis hombre/máquina

El momento crucial aconteció en 1962. La Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación del Pentágono (ARPA) contrató a J. C. R. Licklider, psicólogo experimental, para que organizase un nuevo programa sobre mando y control. Diez años antes, en el MIT, Licklider había intervenido en el proyecto de la consola SAGE, especializándose en los aspectos



relacionados con el factor humano. Esta experiencia le llevó a imaginar, en 1957, un "Sistema verdaderamente SAGE" dirigido no hacia la seguridad nacional, sino a reforzar el poder de la mente. En lugar de los 23 centros de defensa aérea, Licklider contemplaba una red nacional de "centros pensantes", dotados de ordenadores que contendrían vastas bibliotecas en las que tendrían cabida todos los temas imaginables. Por consolas de radar soñaba con un enjambre de terminales interactivos, capaces cada uno de presentar textos, fórmulas, figuras, diagramas o cualquier otra vía de información.

En 1958, Licklider empezó a llamar "simbiosis" del hombre y la máquina a su visión; cada uno sobresaldría en su propia esfera: los algoritmos rutinarios, para las computadoras; la heurística y la creación, para el hombre. El simbionte resultaría mucho más poderoso de lo que cada uno pudiera serlo por separado. Estas ideas quedaron claramente enunciadas por escrito en 1960 en un artículo ahora clásico, "Man-Computer Symbiosis". Allí establecía un programa de investigación sobre la forma de convertir su visión en realidad. Una vez en ARPA, se mostró decidido a utilizar el dinero del Pentágono para llevar a efecto tal programa.

La principal iniciativa de Licklider fue el proyecto MAC del MIT, el primer experimento en computación personal llevado a cabo hasta entonces. Los directores del proyecto no podían esperar ofrecer a nadie un ordenador personal autónomo cuando las máquinas más económicas costaban todavía cientos de miles de dólares. Pero sí podían repartir docenas de terminales remotos por el recinto universitario e incluso en algunos domicilios. Y después, gracias a la técnica de compartición de tiempos, podían decirle a su gran máquina central que fuera asignándoles pequeños segmentos de tiempo de proceso muy, muy rápidamente, de modo que cada usuario tuviera la impresión de que la máquina le respondía personalmente, en tiempo real. A mediados de los años sesenta, el Proyecto MAC había evolucionado hasta convertirse en la primera comunidad "en línea" del mundo, en la que no faltaban "tablones de anuncios" (BBS), el correo electrónico, amistades "virtuales", intercambio de programas gratuitos, pero ni ciberfisgones ni cibermaleantes.

Otro de los beneficiarios de Licklider fue Douglas C. Engelbart, un ingeniero que trabajaba para SRI International, afamada firma de asesoría de Menlo Park, en California, cerca de lo que luego sería Silicon Valley. Los superiores de Engelbart habían encontrado "incomprensibles" sus ideas sobre "la potenciación del intelecto humano", pero Licklider reconoció inmediatamente que eran idénticas a su propia visión simbiótica. Dotado de financiación de ARPA (así como de la Fuerza Aérea y de la NASA), Engelbart procedió a inventar el ratón, las ventanas en pantalla, el hipertexto, el procesamiento de textos a pantalla completa y una multitud de otras innovaciones. La demostración que de tales maravillas realizó Engelbart en la Fall Joint Computer Conference de San Francisco, en diciembre de 1968, será recordada como uno de los puntos de cambio de rumbo de la historia de la informática: fue el momento en que gran número de profesionales empezaron a comprender lo que la computación interactiva podría lograr.

En términos generales, la estrategia de Licklider en ARPA consistía en buscar grupos de investigación aislados que estuvieran

El autor

M. MITCHELL WALDROP es autor de *The Dream Machine*, una historia de la informática que le sirvió de base para la redacción de este artículo. Waldrop se doctoró en física de partículas elementales y licenció en periodismo por la Universidad de Wisconsin en Madison. Ha sido redactor de *Science*.

realizando ya trabajos coherentes con su propia visión, dotarles de una financiación e integrarlos en un movimiento de amplitud nacional que prosiguiera la tarea después de que él se hubiera ido. (Licklider abandonó ARPA en 1964, ocupando primero un puesto en IBM y, después, un nuevo cargo en el MIT.) El 25 de abril de 1963, en un comunicado a "los miembros y afiliados de la Red de Computación Intergaláctica" —es decir, a sus principales investigadores— Licklider esbozaba una parte clave de esa estrategia: la interconexión de todos sus ordenadores individuales y todos sus sistemas de tiempo compartido, para crear una sola red informática extendida por todos los EE.UU. A finales de los años sesenta, los sucesores de Licklider en ARPA, que habían sido cuidadosamente seleccionados, comenzaron a implantar su "red intergaláctica" con Arpanet, una red digital nacional que interconectaba las sedes de investigación informática sostenidas por ARPA. Y en el decenio siguiente comenzaron a extender la Arpanet hasta convertirla en la red de redes hoy conocida por Internet.

Otra pieza de la estrategia de Licklider, quién sabe si más importante aún, consistió en volcar en universidades la mayor parte de los fondos asignados a su investigación. Sus sucesores continuaron esa misma política. En consecuencia, la visión de simbiosis entre humanos y máquinas que Licklider alentaba fue incorporada en la corriente principal de la industria informática por toda una generación de graduados en ciencias de cómputo. Esta fue la generación que construyó la Arpanet, la promoción que habría de reunirse en el PARC en los años setenta, legendario centro de investigación de Rank Xerox en Palo Alto, donde darían a la visión de Licklider la forma que seguimos utilizando hoy: un ordenador personal autónomo, equipado con una pantalla de presentación de gráficos y un ratón. Una impresora láser para dar salida impresa a lo necesario. La red de área local Ethernet para interconectar a todos. Y, desde luego, la interfaz de usuario que alcanzaría la fama con el ordenador Macintosh, es decir, la interfaz con ventanas, iconos, menús, barras de desplazamiento y todo lo demás.

Fue esta generación, junto con los estudiantes que aprendieron de ella, la que daría expresión ingenieril a la revolución informática de los años ochenta y la revolución que supuso la interconexión en red de los noventa, al cabo de más de 50 años desde que Jay Forrester y sus colegas empezasen por vez primera a reflexionar sobre la computación en tiempo real.

Bibliografía complementaria

BIT BY BIT: AN ILLUSTRATED HISTORY OF COMPUTERS. Stan Augarten. Ticknor and Fields, 1984.

A HISTORY OF PERSONAL WORKSTATIONS. Compilación de Adele Goldberg. ACM Press History Series, ACM Press, 1988.

MAN-COMPUTER SYMBIOSIS. J. C. R. Licklider en *In Memoriam: J. C. R. Licklider 1915-1990*. Compilación de Robert W. Taylor. Digital Systems Research Center Reports, vol. 61. Palo Alto, Calif., 1990.

DIGITAL AT WORK: SNAPSHOTS FROM THE FIRST THIRTY-FIVE YEARS. Dirigido por Jamie Parker Pearson. Digital Press, 1992.

TRANSFORMING COMPUTER TECHNOLOGY: INFORMATION PROCESSING FOR THE PENTAGON, 1962-1968. Arthur L. Norberg y Judy O'Neill. Johns Hopkins University Press, 1996.

A HISTORY OF MODERN COMPUTING. Paul E. Ceruzzi. MIT Press, 1998.

THE DREAM MACHINE: J. C. R. LICKLIDER AND THE REVOLUTION THAT MADE COMPUTING PERSONAL. M. Mitchell Waldrop. Viking, 2001.

La apertura del paso del Drake

Al crear un portal oceánico, el paso del Drake permite la instauración de la Corriente Circumpolar Antártica, que lleva al aislamiento térmico del continente. Como consecuencia, el desarrollo de grandes casquetes polares y la formación de agua profunda influyen sobre el sistema de circulación oceánica global

Andrés Maldonado

La característica más genuina de la Antártida es su manto de hielo permanente. Cubre éste un área de $13{,}6 \times 10^6$ km^2, con un espesor promedio de 2,3 km, aunque llega a alcanzar los 4,5 km, que representa el 90 % del hielo en la Tierra y el 80 % de las reservas mundiales de agua dulce. Este casquete crea un clima extremo, con temperaturas de –50 ºC a –60 ºC en el interior del continente durante la mayor parte del año.

La presencia humana implica un extraordinario reto, medios técnicos refinados y elevadas inversiones económicas. El inmenso continente antártico se encuentra, además, protegido por protocolos internacionales, así el de Madrid, que lo identifican como la mayor reserva natural de la humanidad y donde la única actividad implícitamente autorizada es la investigación básica, pero no la explotación de recursos. Las grandes potencias mundiales y bastantes países en vías de desarrollo dedican un esfuerzo notable al conocimiento y exploración de este continente. Junto a otros pocos lugares remotos, la Antártida representa un patrimonio y una de las últimas fronteras donde aún existen extensas áreas por explorar de nuestro planeta.

El clima actual de la Antártida es, a escala geológica, una situación relativamente reciente. En tiempos del Jurásico el continente se encontraba cubierto por extensos bosques, mientras que el desarrollo de la capa de hielo sólo empieza hacia el final del Paleógeno. En consecuencia, uno de los grandes retos de la investigación se centra en establecer el momento del desarrollo del casquete polar y las causas que condicionan su evolución.

Nadie discute la influencia de una Antártida glacial sobre la circulación oceánica, el clima y los cambios de nivel del mar, aunque los mecanismos que la rigen y su evolución futura sigan siendo objeto de amplio debate. Además, con anterioridad a la formación del manto de hielo del hemisferio septentrional, la Antártida controló los cambios de nivel del mar y fue un componente básico del motor climático mundial.

La superficie marina cubierta por hielo varía de manera muy notable entre invierno y verano, así como de unos años a otros. Se localiza casi en su totalidad, con excepción de la península Antártica, dentro del círculo polar (66º 33’ S). En invierno el hielo marino, “la banquisa”, alcanza los 60º S, con un espesor promedio de 2 m. La influencia climática se hace patente a través de las extensas capas de hielo marino, que modifican el albedo, condicionan la producción primaria y controlan la circulación oceánica mundial; alteran, además, las masas de agua, al formar agua salina fría profunda que se incorpora al sistema global.

A pesar de su indudable interés científico y de ser un santuario na-

El autor

ANDRES MALDONADO es profesor de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y director del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, centro mixto del CSIC y la Universidad de Granada. Ha dirigido cinco campañas de geofísica y geología marina en la Antártida a bordo del BIO HESPERIDES orientadas al estudio de la fragmentación continental, desarrollo de cuencas oceánicas y procesos paleooceanográficos relacionados con la instauración de la circulación profunda. Se le ha concedido el premio Du Pond para el Fomento de la Ciencia.



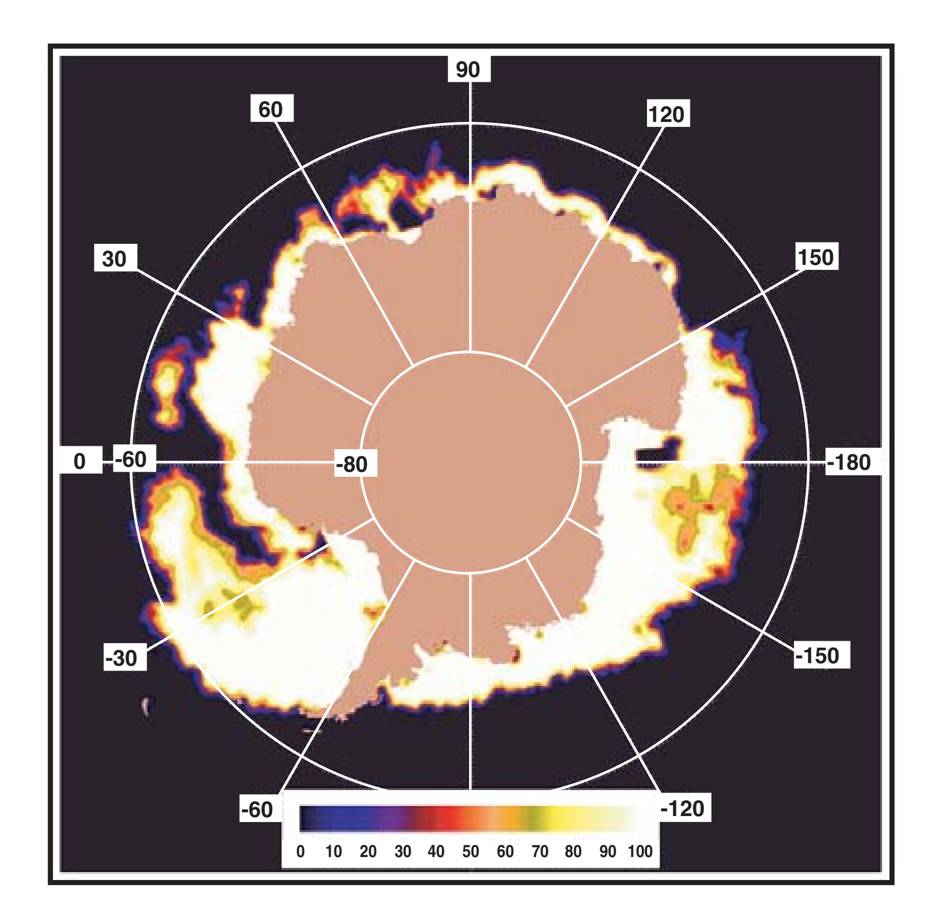
1. LA ANTARTIDA está integrada por dos regiones muy dispares, separadas por los fuertes relieves de la cadena Transantártica. La distribución de la capa de hielo actual, el sistema de drenaje principal y la dinámica de los hielos de la Antártida oriental difieren de lo que observamos en la Antártida occidental. La península Antártica es una región sumamente sensible al cambio climático. El mapa muestra los sistemas de drenaje y espesor de la capa de hielo actual.

tural, en el momento actual, en el que una gran parte de investigación básica tiene implicaciones aplicadas, podemos plantearnos cuáles son los retornos previsibles del estudio de la Antártida. ¿Compensa el esfuerzo investigador en las citadas condiciones? ¿Qué se puede investigar en la Antártida que no sea posible en otras partes de la Tierra? ¿De qué modo influye la evolución de la Antártida sobre el clima y ambiente globales? ¿Qué secretos extraordinarios encierra? ¿Qué retornos científicos se esperan del gran esfuerzo necesario para investigar un medio tan hostil?

Esas y otras preguntas similares tienen una respuesta inmediata: la Antártida es, ante todo, lo hemos repetido, un patrimonio científico y un reto para la humanidad. Y una aventura para el conocimiento de una de las partes más inhóspitas de nuestro planeta, donde las extremas condiciones climáticas implican un riesgo diario para el investigador. No menos difícil, a pesar de los avances y medios logísticos actuales, que a principios del siglo pasado, cuando alcanzar el polo Sur le supuso a Scott, en enero de 1912, la pérdida de su vida y la de todos los miembros de la expedición que le acompañaban.

Datos y modelos

Los importantes conocimientos obtenidos sobre la Antártida en los últimos decenios, básicamente a partir de programas internacionales que incluyen la extracción de datos geofísicos y sondeos en el hielo y suelo oceánico, nos indican que, durante los postreros 6000 años, el volumen de hielo, el nivel del mar y el clima han permanecido relativamente estables, estabilidad que se



2. IMAGEN restituida del satélite NOAA. Muestra la distribución de la capa de hielo marino en diciembre de 2000. Nótese el notable desarrollo del hielo en el mar de Weddell y parte del mar de Scotia meridional. Ese año el hielo marino en primavera/verano ocupaba de manera excepcional una posición semejante a la máxima extensión del hielo en invierno.

derrumba de manera acelerada debido al calentamiento global inducido por las emisiones de CO_2 a la atmósfera.

Si tales emisiones continúan a un ritmo creciente, se pronostica para la próxima centuria un calentamiento global de +2 (±1) °C y el doble en la Antártida. Este aumento de temperatura parece pequeño, pero no tanto si se compara con los –5 °C de enfriamiento que fueron suficientes para disparar la última época glacial de hace unos 18.000 años. El aumento predicho de temperatura, como consecuencia del efecto invernadero, llevaría a la Tierra a una situación climática semejante a la que se produjo hace unos 12 millones de años (Ma), muy próxima a la época de transición entre los casquetes de hielo dinámico y los hielos permanentes de la Antártida.

Los modelos matemáticos sobre la evolución del hielo ponen de relieve, por otra parte, que en la Antártida occidental la mayoría de las capas de hielo se fundirían con un aumento de la temperatura entre +5 y +10 °C, llegando virtualmente a desaparecer cuando la temperatura aumentara +20 °C, lo que equivale a un aumento global de la temperatura de +10 °C. La pérdida de hielo supondría un aumento del nivel del mar de +70 m, con todas sus implicaciones sobre la evolución de la humanidad y la Tierra, donde grandes núcleos de población se distribuyen a lo largo de la costa.

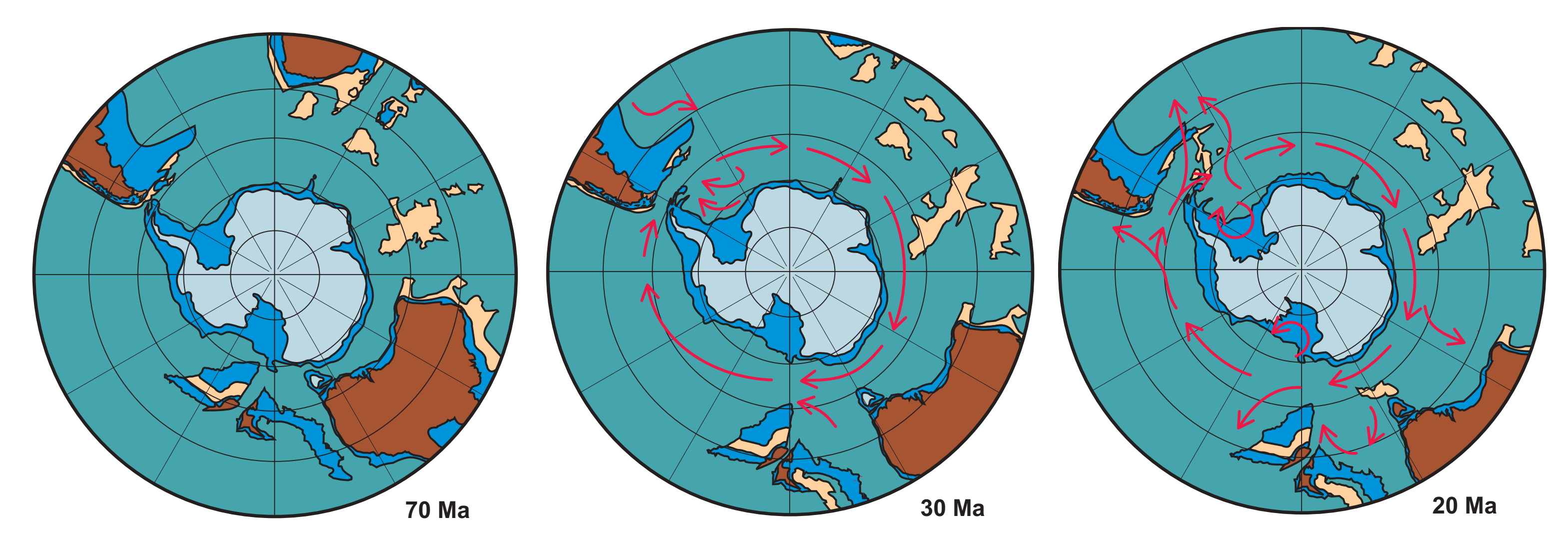
Origen y evolución de la Antártida

Hace unos 200 Ma la Antártida formaba parte de Gondwana, el supercontinente meridional con bosques tropicales y caracterizado por temperaturas al menos +20 °C superiores a las de hoy. La posterior ruptura de Gondwana durante el Mesozoico dio lugar al continente actual. Los datos de paleomagnetismo muestran que la Antártida se encontraba en posición polar desde el Cretácico inferior, hace unos 120 Ma. ¿Por qué no se inician los casquetes polares hasta mucho más tarde, en el Terciario inferior?

La respuesta reside, por una parte, en la evolución del clima global, pero por otra hay que buscarla en la influencia de la circulación paleooceanográfica, condicionada por la creación de nuevos portales oceánicos entre continentes. En concreto, la evolución del paso del Drake entre Sudamérica y la Antártida permite la instauración del régimen oceanográfico circumpolar, uno de los mayores motores de la circulación oceánica mundial.

Las principales pruebas indirectas sobre la evolución de la capa de hielos nos las ofrecen la curva global de cambios eustáticos y la composición isotópica del agua marina, ligada a la salinidad. Ahora bien, la composición isotópica de los microfósiles calcáreos que suministran la composición pasada del agua depende también de la temperatura del agua, con lo que se origina una ambigüedad difícil de eliminar. A pesar de dicha ambigüedad y de las discrepancias entre las curvas eustática e isotópica, estos indicadores indirectos permiten establecer los grandes rasgos de la evolución de los casquetes polares.

La historia de la instauración de los casquetes polares en la Antártida se puede así restringir al Cenozoico, donde ha habido dos períodos de enfriamiento importantes: uno entre 34 y 37 Ma, que marca el inicio de la formación de grandes capas de hielo dinámico, y el otro a partir de unos 15 Ma, que conlleva el desarrollo de los casquetes de hielo permanentes. Un evento frío de menor magnitud ocurrió hace unos 2,5 Ma y dio lugar al desarrollo por primera vez de capas de hielo en el hemisferio norte. Posteriormente se instaura el régimen glacial actual en la Antártida, caracterizado por la al-



3. REPRESENTACION ESQUEMATICA de la tectónica de placas alrededor de la Antártida en el Cretácico superior, Oligoceno inferior y Mioceno medio. Se aprecia el desarrollo de la CCA como consecuencia de la apertura del paso del Drake, que llevó al aislamiento térmico de la Antártida.

ternancia de períodos de avance y retroceso de las capas de hielo sobre la plataforma continental y la existencia de extensas zonas vulnerables, que pueden desplomarse.

La paleogeografía de la Antártida durante el Paleoceno y el Eoceno, parecida a la del Cretácico superior, muestra un continente en situación polar, aún unido a Sudamérica y Australia. Aunque no faltan pruebas locales sobre la posible existencia de glaciares durante cortos intervalos de tiempo en estas épocas, no se ha podido demostrar hasta el momento el desarrollo extensivo de casquetes polares. Durante el principio del Oligoceno, por el contrario, se asiste a una radical reorganización paleogeográfica. Australia y Sudamérica empiezan a derivar hacia el norte, aislando la Antártida e instaurando la corriente Circumpolar Antártica (CCA), que lleva al enfriamiento del continente. El gran salto en la composición de los isótopos de oxígeno refleja el desarrollo de aguas profundas con una circulación termohalina y la reorganización de una circulación oceánica de dos a tres capas.

Tras el estudio de las secuencias deposicionales en los márgenes continentales y los resultados del Programa de Sondeo Oceánico (ODP, de "Ocean Drilling Program") ha quedado establecida la presencia de capas de hielo en las proximidades de la plataforma continental desde el Eoceno medio a superior (34 a 42 Ma). Las primeras capas que se expanden para enraizarse en la plataforma continental hasta el borde del talud se desarrollan entre el Eoceno superior y el Oligoceno inferior (30 a 35 Ma) en la bahía de Prydz, durante el Mioceno inferior (16 a 24 Ma) en el mar de Ross y al menos durante el Mioceno medio (11 a 16 Ma) en el mar de Weddell.

En el margen continental de la península Antártica se registra un cambio importante en el estilo cíclico de la sedimentación hace 9 Ma; representa probablemente el avance de los casquetes polares hasta el borde de la plataforma en esta área más septentrional del continente. Ello refleja el carácter dinámico de esos primeros casquetes polares y su irregular distribución, empezando por el continente y migrando hacia el mar. Se trata, sin embargo, de datos provisionales y falta disponer de una cronología absoluta ratificada por más sondeos.

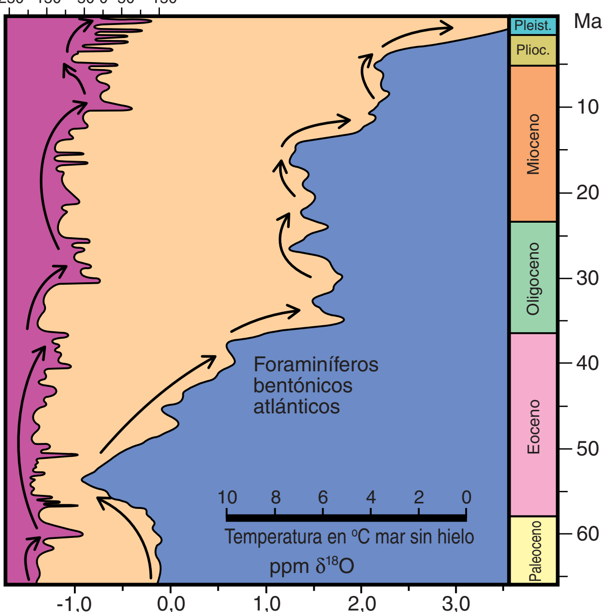
En el inicio del Mioceno medio la Antártida se encontraba totalmente aislada y la CCA bien instaurada. Los isótopos de oxígeno nos hablan de un fuerte incremento en el ^{18}O y las oscilaciones eustáticas de corto término muestran grandes cambios como resultado de un notable incremento en los casquetes polares. Se ha propuesto que la extensión de los hielos en la plataforma continental ha aumentado desde entonces y, de manera acentuada, probablemente en tiempos geológicos más recientes.

Sobre las características de los casquetes polares durante el Plioceno, unos investigadores sostienen la estabilidad, mientras que otros postulan fuertes deglaciaciones. Los datos obtenidos en los márgenes continentales de la Antártida a partir de campañas geofísicas con sísmica multicanal y sondeos del ODP muestran, sin embargo, de manera inequívoca, ciclos de avance y retroceso de las capas de hielo hasta el borde de la plataforma continental, mientras que no existen pruebas claras de una deglaciación en el Plioceno inferior. La variación de los casquetes de hielo antártico ha podido llegar hasta un 1/3 del volumen, lo cual ayuda a explicar las amplias fluctuaciones del nivel del mar en ese período.

Durante el Cuaternario el carácter más notable del registro geológico de isótopos de oxígeno y cambios del nivel del mar reside en su marcada naturaleza cíclica. En el presente período interglacial, que comenzó hace unos 12.000 años, la línea de enraizamiento de las capas de hielo antárticas yace en las partes próximas o dentro del continente, mientras hacia el mar existe una plataforma continental profunda (300-600 m, en comparación con los 100-200 m de

las plataformas de bajas latitudes) e inclinada hacia tierra.

Durante los períodos glaciales, cuando los casquetes polares en el hemisferio norte se hallaban muy extendidos y el nivel del mar descendió hasta –130 m, las capas de hielo antárticas avanzaron en muchos sectores hasta el borde de la plataforma continental. Estos ciclos vinieron promovidos por cambios en la insolación orbital, posibles responsables también de controlar variaciones de tipo glacial/interglacial en épocas más antiguas, tal como lo sugieren los isótopos de oxígeno.



4. CURVAS DE LA VARIACION EUSTATICA GLOBAL del nivel del mar y de los isótopos de oxígeno en los foraminíferos bentónicos del Atlántico. Estos organismos sirven de indicadores de la evolución de la capa de hielo en la Antártida.

Paso del Drake

Los dos portales que permitieron la instauración de la CCA son los creados por la separación de la Antártida de Australia y Sudamérica. Dado que Australia ha seguido migrando hacia el norte, el portal que hoy en día controla el flujo circumpolar de masas de agua es el paso del Drake, entre Sudamérica y Antártida. Este portal ha experimentado una evolución compleja, con la formación de fuertes relieves submarinos que interceptan los diversos flujos. Importa, pues, analizar en detalle su evolución.

El fondo marino del paso del Drake refleja un mosaico de anomalías magnéticas, zonas de fractura, dorsales de acreción y alineaciones de flujo magmático formado como consecuencia de los procesos de fragmentación continental que dieron lugar a la separación de Sudamérica y la Antártida a partir del Oligoceno. En la actualidad las dos placas principales que coexisten en el área son las de Sudamérica y la Antártica. Entre ambas se encuentra la placa de Scotia, que actúa a manera de extensa zona de cizalla. En el marco de esa evolución conviene mencionar la placa de Phoenix, actualmente extinta, que se sitúa en el borde septentrional de la placa Antártica.

Los perfiles profundos de sísmica multicanal y la reciente elaboración del mapa de anomalías gravimétricas suministrada por la Misión Geodésica GEOSAT de la Marina de EE.UU., datos geofísicos obtenidos a lo largo de los últimos diez años, permiten establecer las principales etapas en la evolución de las cuencas oceánicas.

En la parte central del paso del Drake existen dos dorsales oceánicas extintas: la dorsal Phoenix-Antártica (DPA) y la de Scotia occidental (DSO). Las separa un accidente tectónico de primer orden, la zona de fractura Shackleton, que se extiende entre Sudamérica y la península Antártica, formando un relieve morfológico submarino que supera localmente los 2 km de altitud.

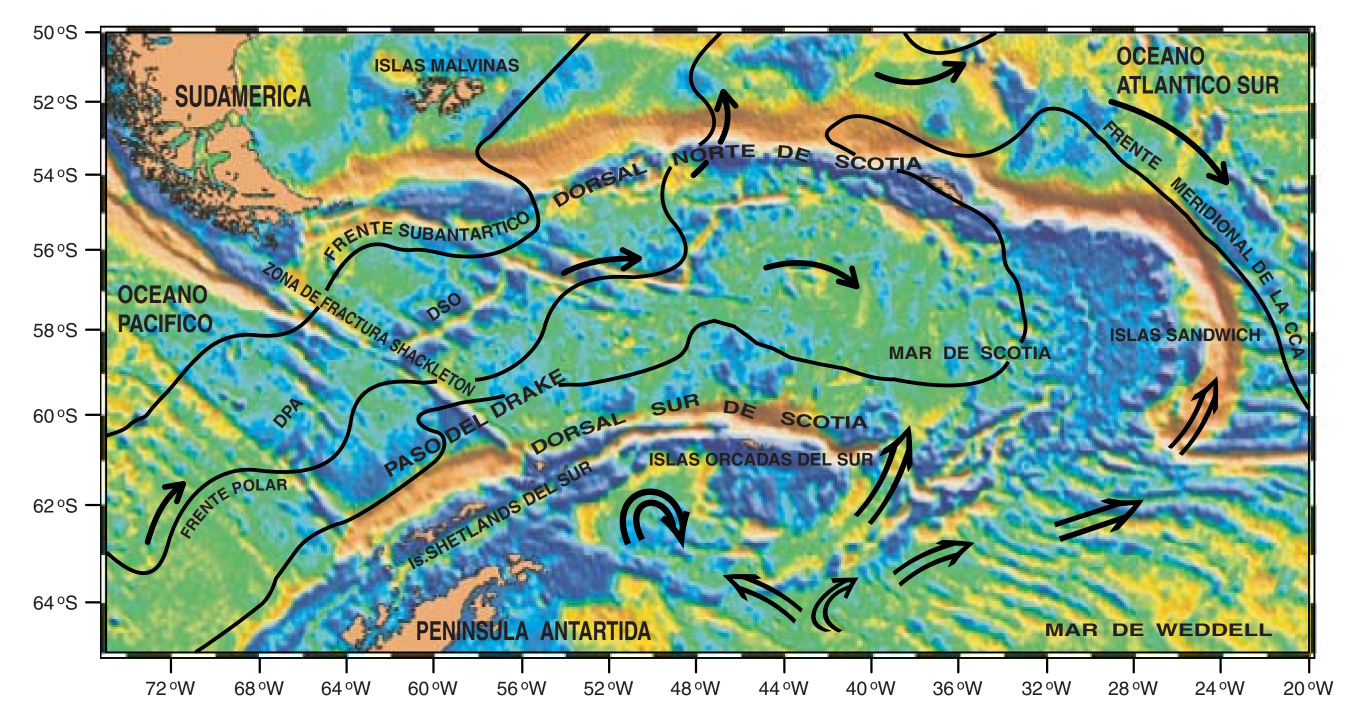
Los mapas obtenidos con sondas multihaz en recientes campañas muestran las características del segmento central de esta típica falla transformante entre dos centros de acreción oceánica. Consta de una serie de relieves longitudinales y paralelos a la zona de fractura, a los que se adosan depresiones profundas y relieves menores, creando un diseño escalonado.

La zona de fractura se formó probablemente al soldarse material cortical en la intersección de la litosfera ya constituida con el centro de expansión, lo cual fue favorecido por el desarrollo de fallas de despegue. La complejidad de la zona de fractura y la creación de cuencas profundas implican, asimismo, la existencia de un régimen tectónico extensivo que posibilitó la aparición de las cuencas. El régimen tectónico actual, mostrado por los mecanismos focales de terremotos, indica por el contrario un régimen comprehensivo a lo largo de la zona de fractura.

La morfología y edad de los dos centros de expansión en la zona central del paso del Drake es muy diferente. La dorsal de Scotia occidental presenta una depresión central, rellena de sedimentos, donde se puede observar en los perfiles de sísmica multicanal reflectores profundos, que son indicadores de la extinta cámara magmática. Este centro de expansión, disimétrico, ofrece un margen meridional mucho más abrupto y somero que el septentrional.

Sin embargo, uno de los segmentos de la dorsal de Phoenix-Antártica está ocupado en su parte central por un fuerte relieve submarino que forma un gran cono que domina el fondo oceánico circundante, aunque en sus bordes existen depresiones en la intersección con las zonas de fractura. El cono central representa una intrusión magmática, que debe jalonar los últimos estadios de expansión debido a un exceso de magma producido por el cese de actividad en la dorsal.

Los modelos de anomalías magnéticas del suelo oceánico muestran que la expansión en la dorsal de Scotia occidental cesó hace unos 6 Ma (cron C3A); para la dorsal Phoenix se extinguió hace unos 3,3 Ma (cron C2A). Todos estos datos geofísicos ponen de relieve



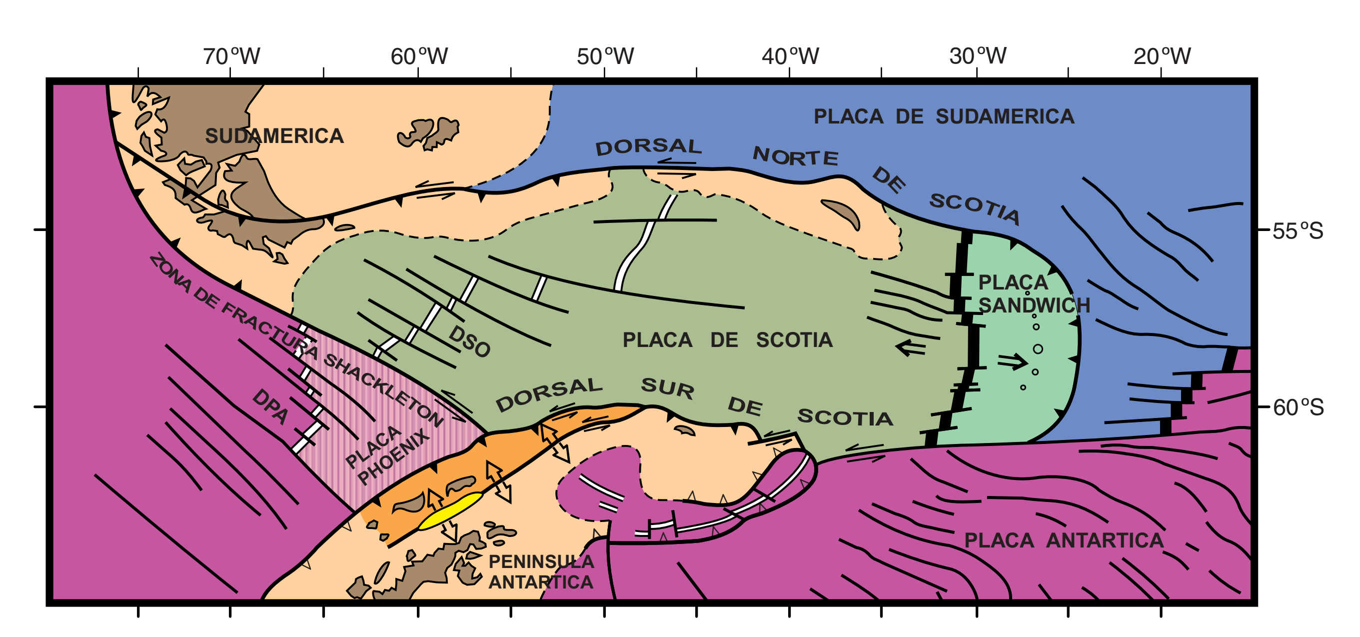
5. MAPA DE ANOMALIAS GRAVIMETRICAS del mar de Scotia y paso del Drake deducido a partir de los datos del satélite GEOSAT de la marina estadounidense. Se representan los principales frentes hidrográficos y el sistema de circulación ocasionado por la Corriente Circumpolar Antártica (CCA; *flechas negras*) y por el Giro del mar de Weddell (*flechas abiertas*).

la complejidad del proceso de separación de Sudamérica y la Antártida, producido sobre todo a partir de dos dorsales o centros de expansión, con la interposición de una prominente falla transformante.

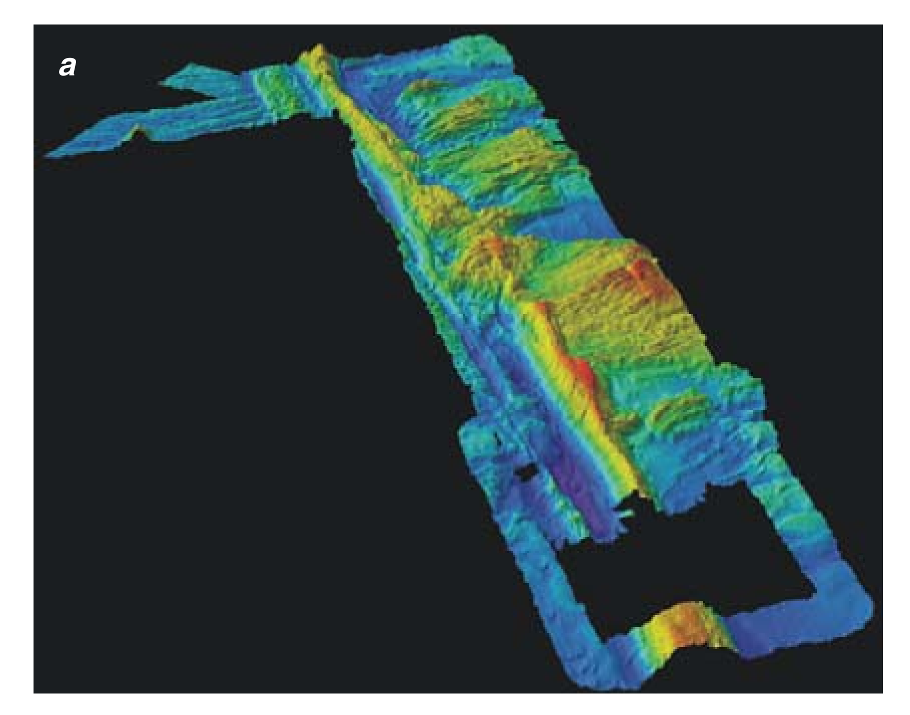
La dorsal oriental cesó su actividad unos 2,7 Ma antes que la occidental. Originó la reorganización total del campo de esfuerzos, que termina con la extinción de la dorsal occidental y la unión de la placa Phoenix a la placa Antártica. La zona de fractura Shackleton continúa activa hasta hoy; ello se debe a que acomoda los movimientos relativos de las placas activas en la zona.

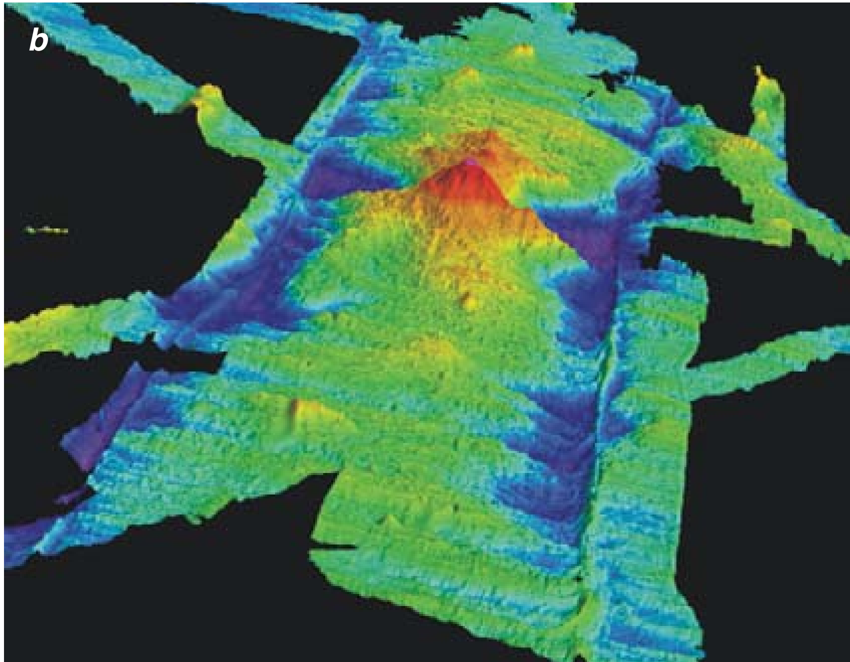
Corriente Circumpolar antártica

El portal del paso del Drake regula en gran medida el flujo de las masas de agua de la Corriente Circumpolar Antártica (CCA) hacia levante. Dicha corriente controla la conexión entre el resto de los océanos mundiales, permitiendo el transporte de



6. MAPA TECTONICO del paso del Drake y regiones adyacentes. Recoge los principales elementos tectónicos del área y las zonas de fractura de la corteza oceánica.





7. IMAGENES de batimetría en relieve de las dos dorsales oceánicas de expansión que se localizan en el paso del Drake, obtenidas a partir de los datos de sondas multihaz durante la campaña ANTPAC 97 con el BIO HESPERIDES y procesados digitalmente. En *a*, imagen de la zona de intersección entre la dorsal de Scotia occidental y la zona de fractura de Shackleton; en *b*, imagen del segmento P2 de la dorsal Phoenix-Antártica.

calor, sales y nutrientes alrededor de la Tierra. La CCA representa el mayor flujo oceánico conocido, transportando 100-140 × 10^6 m^3/s de agua alrededor de la Antártida en sentido horario, flujo que entra en el paso del Drake hacia levante, donde es modificado al chocar con los imponentes relieves morfológicos de la zona de fractura Shackleton.

El flujo principal de la CCA corre paralelo al frente subantártico y frente antártico o polar. Estos frentes son bandas circulares con fuertes gradientes horizontales de densidad superpuestos en el ascenso meridional de las isopycnas (líneas de igual densidad) asociadas al flujo hacia levante de la CCA. El agua profunda de ésta es de origen circumpolar en la parte septentrional del mar de Scotia (temperatura potencial +2 ºC) y procedente del mar de Weddell (temperatura potencial –0,6 ºC) en las inmediaciones del microcontinente de las Orcadas del Sur.

El frente subantártico (FSA), que separa en superficie las aguas subtropicales de las subantárticas, discurre por la parte septentrional del paso del Drake y se prolonga hacia el Atlántico en la proximidad de las islas Malvinas. El Frente Polar (FP) separa en superficie las aguas subantárticas y antárticas, aparece en la parte central del paso del Drake, para hacer una inflexión hacia el norte alrededor del paralelo 50º W siguiendo un collado de la Dorsal Norte de Scotia.

El Frente Meridional de la CCA es el límite meridional de la Corriente Circumpolar Profunda Superior. En contraste con el FSA y el FP, no se trata de un límite entre masas de agua en superficie. Se localiza en la parte meridional del paso del Drake y se inflexiona hacia el norte cuando intersecta la zona de fractura de Shackleton, para penetrar hacia levante en la parte central del mar de Scotia. Estos frentes sufren además una fuerte inflexión hacia el norte, cerca del meridiano 35º W, que refleja la fuerte intrusión de las masas del agua profunda del mar de Weddell en el mar de Scotia.

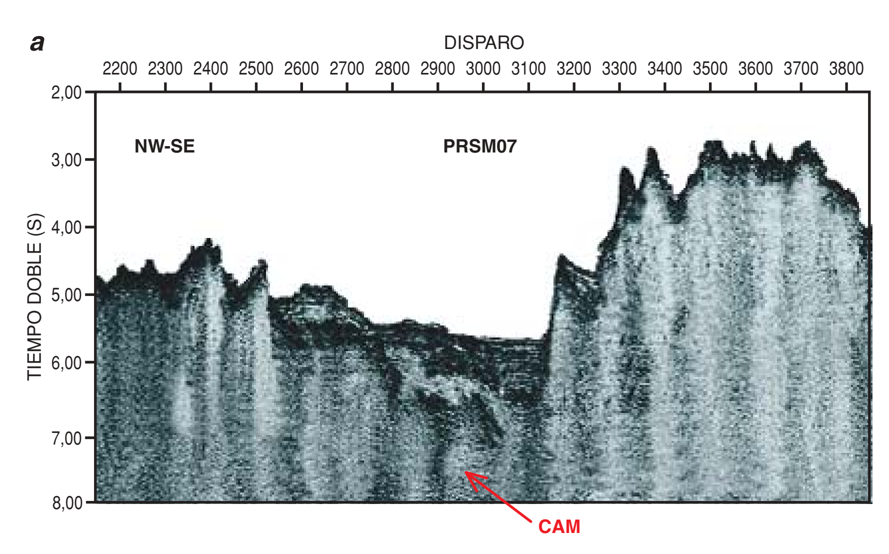
El flujo hacia levante de la CCA se concentra principalmente a lo largo de estos tres frentes, en particular del FSA y el FP. Se han medido corrientes superficiales de 20-60 cm/s en el mar de Scotia, que decrecen generalmente con la profundidad. Se ha medido además la velocidad de flujo cerca del fondo; aunque las velocidades medias se cifran en 7-12 cm, en algunas localidades con una frecuencia superior al 30 % se han registrado valores de más de 15 cm/s.

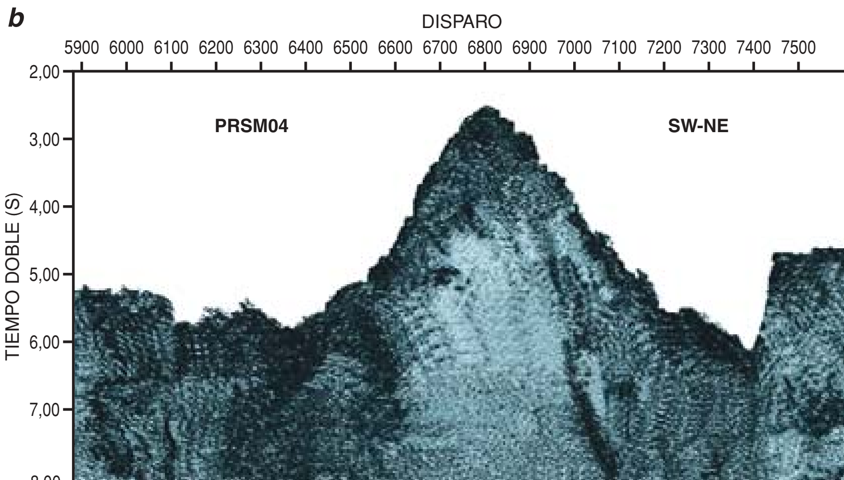
Hacia tierra de la CCA existen corrientes de sentido opuesto, ge-

neradas por los vientos de origen continental y delimitadas por una zona de ascenso de aguas profundas ricas en nutrientes, denominada la divergencia antártica. Otra estructura hidrográfica estable la representa el giro ciclónico de origen barotrópico, generado por el viento; conocido por Giro del mar de Weddell, se encuentra hacia el interior de la CCA.

La morfología del fondo desempeña un papel importante en el control de estos flujos. De los registros de perfiles sísmicos de reflexión del fondo marino se pueden extraer pruebas indirectas sobre la evolución de las aguas profundas y de su distribución. Muestran tales registros una serie de formas deposicionales producidas por los tipos de flujos. La zona del paso del Drake se caracteriza por la existencia de grandes superficies desprovistas de una cobertera sedimentaria. Los flujos permanentes hacia levante que interaccionan con la accidentada topografía del fondo impiden el depósito de sedimentos. Estos sólo se localizan en áreas protegidas por relieves morfológicos que interceptan las corrientes o en depresiones entre elevaciones topográficas, tal como en el eje de la dorsal de Scotia occidental. Los perfiles de reflexión revelan, además, drásticas variaciones en el espesor y tipo de depósitos de unos sectores a otros del mar de Scotia, donde se dan acumulaciones locales con más de 2 km de potencia que han venido creciendo desde el Mioceno inferior.

Los datos geofísicos, junto al análisis de los sedimentos del fondo, han permitido así establecer que, durante el último máximo glacial, el frente polar se desplazó hasta la plataforma al sur de las islas Malvinas, lo que condicionó una mayor penetración de la CCA en el Atlántico Sur, con notables implicaciones sobre el régimen de circulación global y el clima.



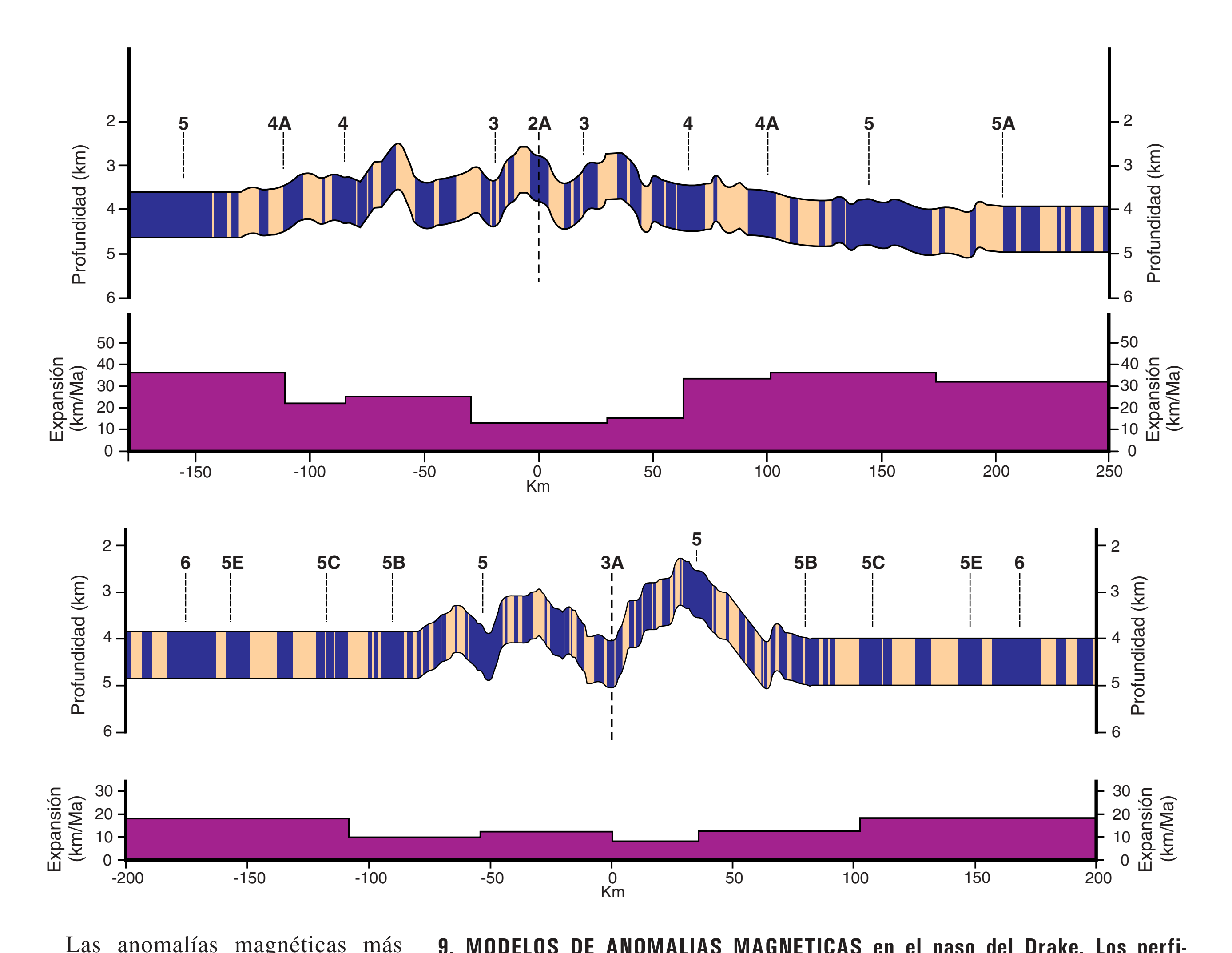


8. PERFILES DE REFLEXION DE SISMICA MULTICANAL. Ofrecen segmentos representativos de las dorsales de expansión en el paso del Drake. La corteza oceánica está desprovista de una cobertera sedimentaria, con la excepción de algunas pequeñas depresiones y en el eje extinto de la dorsal de Scotia occidental. La influencia de la CCA impide el depósito de sedimentos. Los reflectores profundos observados en el eje de la dorsal de Scotia occidental indican discontinuidades petrológicas formadas en la extinta cámara magmática axial (CAM). Dorsal de Scotia occidental (*a*); dorsal de Phoenix-Antártica, segmento P2 (*b*).

Cambios drásticos

Pese a su relativa estabilidad climática durante los últimos milenios, la Antártida constituye un sistema extremadamente sensible que ha experimentado cambios drásticos a escala geológica. La fragmentación continental de Gondwana, con la deriva hacia el norte de Sudamérica y Australia, dio lugar a partir del Oligoceno a la apertura de los portales que propiciaron la aparición de la corriente circumpolar. El aislamiento del extenso continente en posición polar condiciona la instauración de grandes casquetes de hielo dinámico que avanzan hacia el margen continental.

Resulta todavía difícil precisar las relaciones de causa a efecto entre la apertura de los portales, la evolución climática global y la instauración de masas de hielo en la Antártida. A tenor de las curvas globales de isótopos de oxígeno mejor establecidas se registra un brusco aumento de aproximadamente +1,2 ppm en el $\delta^{18}O$, que equivale a un descenso de unos –5 ºC en la temperatura del agua marina, coincidiendo con el inicio del Oligoceno. La curva del nivel del mar refleja, asimismo, notables fluctuaciones durante esta época, aunque no es unívoca la correlación entre ambas.



9. MODELOS DE ANOMALIAS MAGNETICAS en el paso del Drake. Los perfiles corresponden a perpendiculares al eje de las dos dorsales extintas. La expansión en la Dorsal de Scotia occidental terminó en la anomalía magnética C3A (6 Ma), mientras que en la dorsal de Phoenix-Antártica la última anomalía magnética reconocida es la C2A (3,3 Ma).

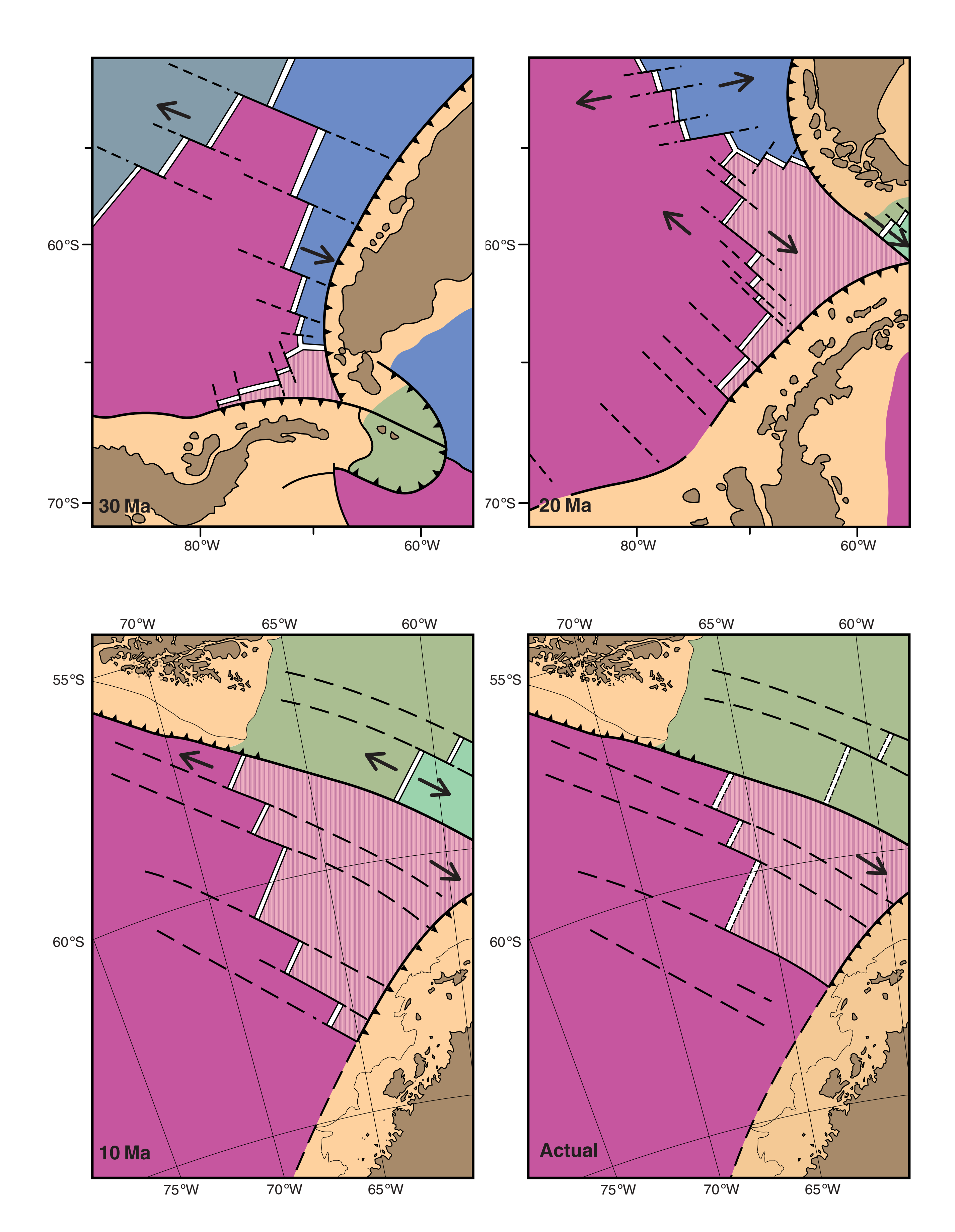
Las anomalías magnéticas más antiguas del mar de Scotia ponen de relieve una expansión generalizada que comenzó hace unos 27 Ma en el paso del Drake, aunque existen pruebas de expansión previa en las proximidades de Tierra del Fuego y en la Dorsal de Scotia meridional (29 Ma). Con anterioridad a esta fase la zona entre el extremo meridional de Sudamérica y la península Antártica estaba ocupada por una serie de fragmentos continentales, dispersos hoy alrededor del mar de Scotia. Probablemente existían estrechos que permitían cierto grado de corriente circumpolar, tal como ocurre ahora a través de las dorsales del mar de Scotia, pero en cualquier caso sería muy restringida y de una magnitud muy diferente de la actual.

Tampoco se tienen datos suficientes para establecer el momento y la extensión de las capas de hielo en la Antártida, aunque durante el Oligoceno inferior todos los datos suministrados por los sondeos indican una notable extensión de hielo, que se ha estimado en un 60 % del actual según los isótopos de oxígeno. Al principio del Oligoceno superior se produjo otro pico positivo en el $\delta^{18}O$, que coincidió con un notable descenso del nivel del mar; ello indica una clara progresión de los casquetes polares hacia el margen continental, quizá superior a la actual.

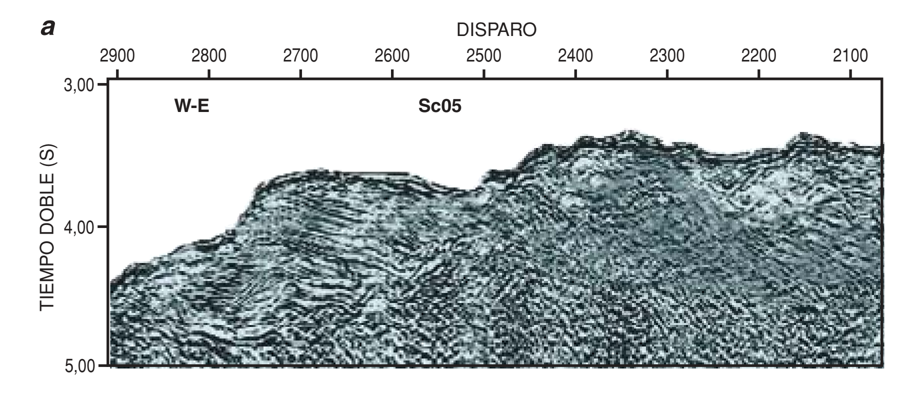
A partir de las anomalías magnéticas podemos reconstruir la evolución del paso del Drake, de manera fiable, desde el cron C8 (27 Ma) para el mar de Scotia y, desde C6A (22 Ma), para la placa Phoenix. Entre la anomalía C8 y el margen continental en el sector suroccidental del mar de Scotia existe una zona de corteza oceánica extensa donde no se han registrado trazas de anomalías magnéticas, aunque sí indicios de deriva continental con anterioridad a C8.

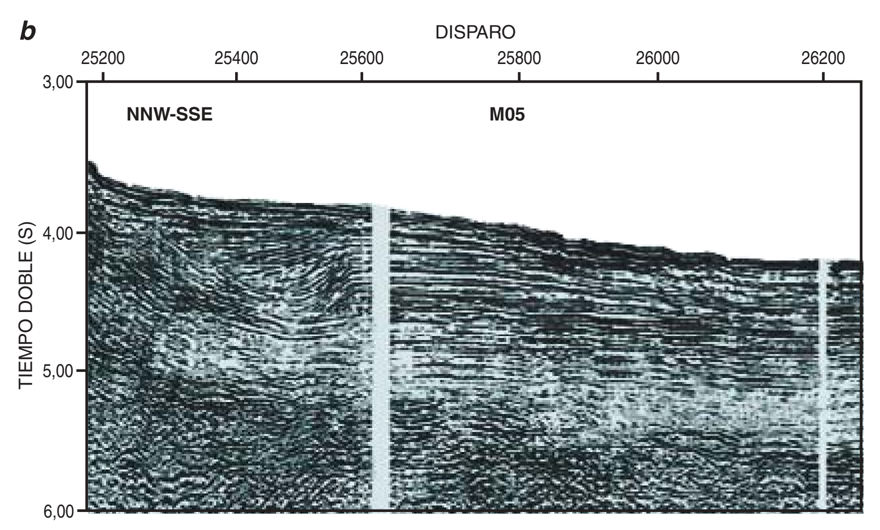
En la placa de Scotia, la subducción, que sigue activa, de corteza oceánica por debajo del arco de las islas Shetland del Sur ha eliminado la parte del registro anterior a C6a. Si se postula que los índices de expansión en la placa de Scotia se han mantenido bastante estables desde el principio de su evolución, se obtiene una edad mínima de 32 Ma, a partir del segmento de corteza oceánica entre C8 y el margen.

Los datos recientes muestran, por otra parte, que ha habido asimismo subducción de corteza oceánica por debajo de la dorsal de Scotia me-



10. MAPAS simplificados con la evolución de tectónica de placas en el paso del Drake, reconstruidos a partir de la distribución de anomalías magnéticas. Se representan cuatro etapas significativas entre el Oligoceno medio y la actualidad.





11. SEGMENTOS REPRESENTATIVOS de perfiles de SMC. Ponen de manifiesto el gran desarrollo de depósitos generados por corrientes de fondo paralelas al margen (contornitas). En *a* se ofrecen contornitas en el mar de Scotia meridional al noreste de las islas Orcadas del Sur con depósitos producidos por el agua profunda del mar de Weddell en su recorrido hacia el norte a través de las depresiones en la Dorsal sur de Scotia; en *b*, un depósito de contornitas en el margen septentrional de la cuenca Powell producidas por una rama del agua profunda del Giro del mar de Weddell.

ridional, lo cual suministraría una edad aún más temprana para el desarrollo de expansión en el paso del Drake. Según estos datos, la instauración de grandes casquetes polares en la Antártida pudo coincidir en el tiempo con el inicio de portales restringidos en el paso del Drake y, en consecuencia, con la instauración de la CCA.

Hay otro factor importante que ha contribuido, además, al desarrollo del casquete antártico. Este es indudablemente el notable descenso generalizado de las temperaturas en la Tierra, quizás influenciado por cambios orbitales, que muestran los isótopos de oxígeno desde el Eoceno inferior y que se acentúa en el Oligoceno. Pero es el establecimiento de la corriente circumpolar, consecuencia directa de la apertura de los portales y más concretamente del paso del Drake, la que conlleva al aislamiento climático de la Antártida. Esta evolución ha permitido, por último, el establecimiento del modelo de circulación actual, que es un agente determinante en el desarrollo del gran casquete polar antártico y de su extensión hasta el borde de la plataforma continental.

Nuevos estudios deberían ayudar a establecer cuál ha sido la aportación relativa de cada uno de estos fenómenos en la evolución glacial de la Antártida, la circulación global en los océanos y, a la postre, el clima mundial. Ello podría dar la clave para una mejor predicción de la evolución futura de los casquetes polares y, en definitiva, de la humanidad, tan dependiente de la evolución del clima y de los océanos. A pesar de la aparente estabilidad de los hielos antárticos durante los últimos 6000 años, se trata de un sistema que depende de un balance delicado. Si las predicciones sobre el efecto invernadero provocado por las emisiones de CO_2 se cumplen, es indudable que el equilibrio del sistema tal como lo conocemos hoy en día se encuentra gravemente amenazado.

La fragmentación continental y la apertura del paso del Drake, que supusieron la instauración de la CCA y la glaciación del continente, son fenómenos de alcance mundial. No obstante, apenas empezamos a conocer la correlación precisa entre la evolución del casquete polar y los factores de tipo climático-eustático y tectónico que han controlado su desarrollo. Carentes todavía de una cronología absoluta de esos fenómenos, queda mucho por averiguar sobre la respectiva importancia de los factores implicados.

Bibliografía complementaria

QUATERNARY HISTORY OF THE ANTARCTIC CIRCUMPOLAR CURRENT: EVIDENCE FROM THE SCOTIA SEA. C. J. Pudsey y J. A. Howe, en *Marine Geology*, vol. 148, pág. 83-112; 1998.

PROCEEDINGS ODP, INITIAL REPORTS 178. OCEAN DRILLING PROGRAM. P. F. Barker y Leg 178 Scientific Party. Texas A&M University, College Station, Texas (CD-ROM vol. 1096-2522); 1999.

AUTOPSY ON A DEAD SPREADING CENTRE: THE PHOENIX RIDGE, DRAKE PASSAGE, ANTARCTICA. R. A. Livermore, J. C. Balanyá, A. Maldonado, J. M. Martínez, J. Rodríguez Fernández, C. Sanz de Galdeano, J. Galindo Zaldívar, A. Jabaloy, A. Barnolas, L. Somoza, J. Hernández, E. Suriñach y C. Viceras, en *Geology*, vol. 18, n.º 7, págs. 607-610; 2000.

TECTONICS OF AN EXTINCT RIDGE-TRANSFORM INTERSECTION, DRAKE PASSAGE (ANTARCTICA). A. Maldonado, J. C. Balanyá, A. Barnolas, J. Galindo Zaldívar, J. Hernández, A. Jabaloy, R. A. Livermore, J. M. Martínez, J. Rodríguez Fernández, C. Sanz de Galdeano, L. Somoza, E. Suriñach y C. Viceras, en *Marine Geophysical Researches*, vol. 21, págs. 43-68; 2000.

Wolfgang Bürger

Tensiones superficiales

Cuando los dedos húmedos levantan una hoja de papel, ¿actúa una fuerza adhesiva? No; se trata de la tensión superficial, omnipresente pero rara vez perceptible

Una ventosa de agua: Cuando tenga las manos mojadas, ponga cuidado al manejar objetos muy ligeros que se humedezcan con facilidad. Si deja con una mano que no esté seca aún un frasquito de perfume en la repisa del espejo del cuarto de baño y la retira apresuradamente, tendrá que contar con que el frasco se le quedará pegado a los dedos, resbalará y caerá dando tumbos en la pila.

La razón de que ocurra tal cosa no será que sus dedos estén pegajosos. El agua pura no constituye ningún pegamento. El efecto en cuestión se debe a las fuerzas capilares originadas por la tensión superficial del agua. La mano se quedará pegada pasajeramente al frasco, pero no podrá establecer una ligazón duradera. Para unos seres vivos del tamaño de los humanos esas fuerzas naturales son muy débiles, más fáciles de medir que de percibir; raras veces notamos su existencia en la vida cotidiana.

Por el contrario, para los zapateros y otros artrópodos que viven justo sobre o bajo la superficie del agua, la tensión superficial es una fuerza intensa. Su vida depende de ella; lo mismo puede protegerles o ayudarles que ser una amenaza permanente.

La araña de agua (*Argyroneta aquatica*) teje una gran campana de aire bajo el agua con un punto tan fino, que la tensión superficial la impermeabiliza. En ella vive y respira, se reproduce y cría a su prole.

El zapatero (*Gerris lacustris*) reposa sobre la superficie, por donde se mueve ágilmente y va a la caza de presas. Tiene cubiertas las patas y el cuerpo entero por un denso vello hidrófobo que lo protege del peligro de que ésta se lo trague y, como es un animal de respiración aérea, se ahogue. La araña de agua aprovecha activamente los intersticios entre los pelos de su cuerpo para transportar hasta la burbuja la provisión de aire que necesita.

También nosotros nos valemos de las fuerzas capilares, por ejemplo, cuando recogemos pequeños trocitos de papel de encima de la mesa o un pedazo de papel de aluminio o de lámina de plástico del suelo. Para sacar partido de la tensión superficial, humedecemos un dedo y lo presionamos fuertemente sobre el objeto. Al levantar la mano el papel o la lámina, si no son muy pesados, se quedarán pegados al dedo. Procura la adherencia la fina película de agua: en ella reina, como pasa también en el volumen de aire encerrado bajo una ventosa corriente de goma, una presión más baja que en el exterior. En este caso la presión reducida no está herméticamente protegida de la presión superior del exterior por una pieza de goma; es la tensión superficial del menisco de la película —la superficie alabeada en contacto con el aire que la envuelve— la que hace posible que se mantenga la diferencia de presión. Débese, en efecto, a la mayor presión exterior la adherencia al dedo húmedo. En la Luna, donde no hay presión atmosférica, una ventosa no valdría para nada.

Tensión superficial: Los líquidos no tienen una membrana o piel que los delimite. Sin embargo, gracias a la atracción mutua de sus moléculas, que es precisamente lo que les confiere el carácter de líquidos, poseen una tensión especial en su superficie. Allá donde faltan fuerzas dirigidas hacia fuera, la tensión superficial crea un equilibrio.

Este tipo de tensión apenas si recuerda la desarrollada por una membrana elástica. La goma de un globo consta siempre de las mismas partículas; por



1. La araña de agua mantiene una burbuja de aire para respirar y cuidar de sus crías; la estabiliza la tensión superficial del agua circundante

Cálculo de la tensión superficial

La fuerza del dedo mojado

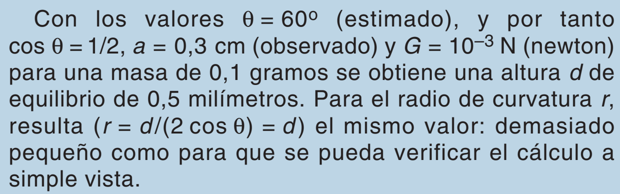
Supongamos por simplicidad que la yema de los dedos y el papel de aluminio son planos allá donde tocan la gota y que la película de agua tiene en su plano una simetría radial plana. El peso de la gota de agua es menor que el del pedazo de papel. La presión interna p_i se puede considerar constante (así como la presión externa p_e). La película de agua, plana arriba y abajo, limita con el aire por una superficie doblemente alabeada con radios de curvatura constantes a y r ($r \ll a$).

Según la fórmula de Laplace ("la diferencia de presión es igual al producto de la tensión superficial por la curvatura media"), cuando se atraviesa de dentro afuera la superficie doblemente curvada de la película la presión salta en una cantidad

$$\Delta p = p_a - p_i = \sigma \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a} \right)$$

donde σ es la tensión superficial del agua (para el agua pura a temperatura ambiente σ = 73 g/s^2 o dina/cm). Si θ es el ángulo que cada lado de la superficie hace con su plano superior (aquí se supone que ese ángulo es igual para ambos lados), el radio de curvatura r y la altura d estarán relacionados geométricamente por la igualdad $d = 2r \cos \theta$. El peso G que la película aguanta en equilibrio es $\pi a^2 \Delta p$, y eso vale aproximadamente. G no puede ser arbitrariamente grande porque no es posible que la presión interna llegue a ser menor que la presión de vapor del agua, y por principio no es posible tampoco que sea negativa. De esas dos igualdades para d y G se obtiene la altura d en el equilibrio:

$$d = \frac{2\pi a^2 \sigma \cos \theta}{G}.$$



Con los valores θ = 60º (estimado), y por tanto $\cos \theta$ = 1/2, a = 0,3 cm (observado) y G = 10^{-3} N (newton) para una masa de 0,1 gramos se obtiene una altura d de equilibrio de 0,5 milímetros. Para el radio de curvatura r, resulta ($r = d/(2 \cos \theta) = d$) el mismo valor: demasiado pequeño como para que se pueda verificar el cálculo a simple vista.

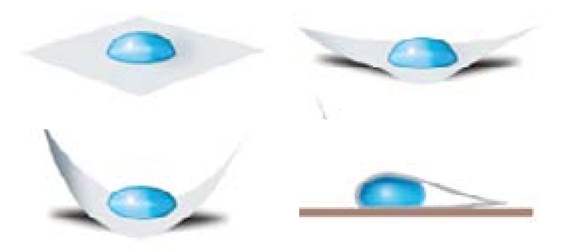
El efecto de los cambios de escala se estudia con la ayuda de parámetros adimensionales, unos números construidos a partir de las principales magnitudes que influyen en el problema de manera que no dependan de las unidades en que se midan éstas. Para la interrelación entre el peso y la tensión superficial, y por lo tanto para la forma de las gotas bajo la influencia de la gravedad, ese parámetro característico es el número de Bond, Bo = $\rho g L^2/\sigma$ (ρ densidad, g aceleración de la gravedad, L longitud característica, σ tensión superficial). Aunque la longitud característica L de 1 cm (insecto) pasara a ser de 2 m (ser humano), o sea, aunque se multiplicara por un factor λ = 200, las gotas seguirían siendo geométricamente similares mientras no cambiase el número de Bond. Para que éste no cambiase, mientras se mantuvieran la misma densidad y la misma gravedad, la tensión superficial debería aumentar en un factor λ^2 = 40.000. Este mundo ficticio no sería coherente, por mucha fantasía que se le echase: la tensión superficial depende de las fuerzas intermoleculares, y para que éstas aumentaran en esa misma proporción tendría también que aumentar enormemente la densidad; entonces, todas las demás propiedades del agua se alterarían, sin que hubiera forma de reconocerlas.

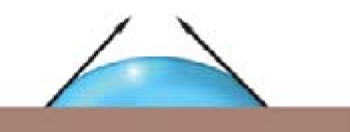


consiguiente, para aumentar su superficie hay que ejercer un trabajo contra las fuerzas de cohesión elásticas del material, que por regla general aumentan con la expansión. En cambio, el trabajo mecánico que hay que invertir para aumentar la superficie de un líquido no depende de la extensión que tenga en ese momento. La energía invertida sólo sirve para sacar moléculas del interior y formar con ellas nueva superficie. Recíprocamente, los líquidos disminuirán de buena gana su superficie al humedecer otros cuerpos en tanto en cuanto alcancen así un estado energético más favorable.

Se puede ver sin gran esfuerzo, con unos meros utensilios de cocina, la facilidad con que el agua humedece las superficies. Vierta una gota en el centro de un trocito de papel de aluminio (con un área de pocos centímetros cuadrados y masa de unos cuantos centigramos). Para dosificar vendrá bien un cuentagotas del botiquín doméstico. Si se acerca muy despacio el dedo a la gota, se podrá captar el momento en que la toca; en ese instante, el papel sufre un leve tirón hacia arriba, porque la gota, al extenderse ávidamente sobre la yema, se vuelve más plana. La gota comprimida queda encerrada por un "menisco" anular. Cuanto más fina sea la película de agua y más se extienda, mayor peso podrá aguantar. Cuesta mucho separar dos portaobjetos cubiertos por películas de líquido muy extendidas; no queda más remedio que desplazarlos paralelamente (y realizar, pues, un trabajo contra la fricción interna del líquido).

Puede hacerse un experimento muy instructivo, parecido al anterior, con un trozo rectangular de película de plástico utilizada para conservar los alimentos: póngale una gota de agua en medio, ¡y verá que se envuelve con el plástico! La gota está en equi-





2. Una gota de líquido, puesta, por ejemplo, sobre una lámina, se esfuerza por minimizar su superficie (la región bidimensional que la separa del aire). En el borde de la superficie de apoyo en la lámina, la fuerza correspondiente es tangencial a la superficie de la gota; apunta, pues, hacia arriba con cierta inclinación (las demás componentes quedan anuladas por la simetría radial). Una lámina más flexible cederá ante esa fuerza

librio mecánico sobre una lámina sólo cuando ésta tiene la rigidez suficiente para aguantar sin doblarse la tensión superficial de la gota (es el caso del papel de aluminio). La tensión superficial del borde de la gota tirará hacia arriba de un material más flexible. La gota puede ganar en tal caso energía al cambiar una parte de su superficie, en contacto con el aire, por una parte fronteriza con la lámina. El resultado final exacto de este envolverse no es predecible, porque la gota raras veces cae justo en medio del pedazo de plástico; además, es difícil calcular el área —que depende de la deformación— de la superficie de la gota y de la parte que queda cubierta por la lámina.

Gotas gigantes: Imagínese que se levanta una mañana, mira por la ventana y se encuentra en un mundo donde la tensión superficial ha aumentado decenas de miles o cientos de miles de veces. La calle, las casas, los coches aparcados se ven igual que siempre, pero para la hora que es faltan los viandantes habituales. Por la noche ha llovido y hay charcos. ¡Pero qué charcos! Parecen más bien gotas de agua gigantes. Una brigada de barrenderos se esfuerza por apartar con grandes escobas el agua que queda. De lejos dan esas escobas una impresión bastante extraña. Parecen tener finas cerdas por todas partes, hasta en el mango. También los hombres llevan una vestimenta cubierta de cerdas, incluidos los zapatos. Lleno de curiosidad, se pone usted algo encima a toda prisa, corre a la calle y se dirige a uno de los charcos ahí plantados en medio del camino como grandes gotas. Un trabajador corre hacia usted tajante: "¡No la toque!" Demasiado tarde: usted se ha inclinado hacia una gota de un metro de alto, la ha rozado con la palma de la mano y de pronto ha sentido como si toneladas le tirasen del brazo hacia la gota. O, según fuese la cantidad, el agua se le vino encima y se lo tragó. Con todo, puede usted decir que ha tenido suerte; pese a sus dos mil kilos de agua, esa gota era demasiado pequeña para engullirlo completamente y ahogarlo.

Despertemos de nuestro sueño; de todos modos no se atiene demasiado a las leyes físicas. Pero lo que para nosotros es pura fantasía, para los animales del tamaño de un insecto es la cruda realidad. No en balde tienen las abejas y las moscas tantos pelos. ¡Alegrémonos de nuestro tamaño! Si no fuésemos tan grandes, para sobrevivir tendríamos que pinchar bastante.



3. El garapito cuelga de la superficie del agua del mismo modo que el zapatero se apoya sobre ella. En ambos casos, la tensión superficial resiste el peso de los animales

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

Paradojas democráticas

En un congreso de teoría de juegos oí una charla sobre la votación para elegir la capital de la Alemania reunificada y cómo el resultado habría sido distinto si se hubiera utilizado otro método de votación. Más tarde, Raúl Toral, de la Universidad de las Islas Baleares, me envió un capítulo de un pequeño libro de Héctor Antoñana, *La danza de los números,* que trataba de la *paradoja de Condorcet*. Contaba historias curiosas sobre cómo el método de votación puede influir en el resultado. Aunque algunos de estos ejemplos se refieren a asuntos de cierta relevancia, como el caso de la capitalidad alemana, daba la impresión de que no eran más que casos singulares, poco útiles para reflexionar acerca de las limitaciones de la democracia.

Sin embargo, esta impresión ha cambiado al indagar más sobre el tema. Políticos y organizaciones, especialmente en Estados Unidos, están tratando de abrir el debate sobre los procedimientos de votación en las elecciones al senado y a los ayuntamientos, y defienden determinados métodos, como la llamada *votación aprobatoria* o el *método Condorcet*. Incluso ha habido proposiciones de ley al respecto, debatidas pero no aprobadas, en algunos estados.

De modo que lo que comenzó como una curiosidad matemática ha resultado tener más trascendencia de lo que parecía inicialmente. Veamos cuál es la matemática que hay detrás de una simple votación.

Supongamos que una clase con 49 alumnos debe elegir a su delegado o representante. Hay tres candidatos, Inés, Diego y Carolina. Cada estudiante tiene sus propias predilecciones. Una suposición básica, y bastante razonable, de la teoría matemática de la votación afirma que si un estudiante prefiere a Inés antes que a Diego, y a Diego antes que a Carolina, entonces preferirá a Inés antes que a Carolina. Esta propiedad se llama *transitividad* y permite asociar a cada estudiante un orden de preferencia. En nuestro ejemplo, dicho orden sería Inés, Diego, Carolina. Lo indicaremos con la notación I > D > C. Supongamos que en nuestra clase 21 alumnos tienen como orden de preferencia I > C > D, 3 alumnos tienen el orden C > I > D, 4 alumnos el C > D > I, 16 alumnos el D > C > I y, finalmente, 5 alumnos tienen el orden D > I > C (obsérvese que, en este ejemplo concreto, ningún alumno tiene el orden I > D > C). Estas preferencias están representadas en la figura.

Si se elige al delegado por medio de una votación única, y si cada alumno vota a su candidato preferido, Inés obtendrá 21 votos, Diego otros 21 (16 + 5) y Carolina sólo 7 votos (4 + 3). Para romper el empate entre Inés y Diego podemos hacer una nueva votación. Si todos los alumnos votan al candidato que prefieren entre los dos que quedan en esta segunda vuelta, entonces Diego ganará con 25 votos (4 + 16 + 5) frente a 24 (21 + 3) de Inés.

Sin embargo, cuando van a nombrar a Diego delegado de la clase, un seguidor de Carolina pide que levanten la mano los alumnos que prefieren a Carolina antes que a Diego. Para sorpresa de todos, 28 (21 + 3 + 4) alzan con decisión su mano, frente a sólo 21 (16 + 5) que prefieren a Diego. Cuando en la clase comienza a extenderse la idea de que es absurdo tener como delegado a Diego cuando sólo una minoría lo prefiere a Carolina, y se está a punto de nombrar a ésta delegada de la clase, un seguidor de Inés pregunta de nuevo: ¿Quién prefiere a Inés antes que a Carolina? Se cuentan las manos levantadas y resulta que 26 (21 + 5) alumnos prefieren a Inés, frente a 23 (3 + 4 + + 16) que se quedarían con Carolina. La confusión se apodera de los alumnos.

Nuestra desorientada clase ha sido víctima de la llamada *paradoja de Condorcet*, en honor de Antoine de Caritat Condorcet, que estudió el problema a finales del siglo XVIII con la intención de encontrar el tamaño óptimo de los jurados que instauraría la Revolución francesa. La paradoja advierte, en pocas palabras, que la transitividad de las preferencias de cada individuo no tiene por qué dar lugar a transitividad en las preferencias de un colectivo. En efecto, que una mayoría de la clase prefiera a Inés antes que a Carolina y a Carolina antes que a Diego no conduce necesariamente a que Inés sea preferida mayoritariamente sobre Diego. Se puede formar así un ciclo en las preferencias colectivas, como en el caso de nuestro ejemplo.

La paradoja de Condorcet no se produce siempre. Por ejemplo, si en nuestra clase eliminamos a los cinco votantes cuyas preferencias son D > I > C, entonces las votaciones "cara a cara" tendrían los siguientes resultados: Carolina obtendría 28 votos (21 + 3 + 4) frente a 16 de Diego. Inés, con 24 votos (21 + 3), también vencería a Diego con 20 (4 + 16). Y, finalmente, Carolina derrotaría a Inés con 23 votos (3 + 4 + 16) frente a 21. En este caso Carolina es preferida a los otros dos candidatos. Decimos entonces que Carolina es una *ganadora Condorcet*. La existencia de la paradoja de Condorcet es equivalente a que no exista ningún ganador Condorcet.

El sistema de enfrentar los candidatos por pares y quedarse con el ganador Condorcet es uno de los varios métodos posibles de elección de un candidato. Como hemos visto, de vez en cuando falla, puesto que ninguno de los

candidatos es capaz de derrotar al resto. Cuando esto ocurre, el método de votación de Condorcet se complementa con una regla simple. De los distintos enfrentamientos por pares se elimina el más reñido, es decir, aquel en el que la diferencia entre el ganador y el perdedor es mínima. Si eliminando este enfrentamiento aparece un ganador Condorcet, éste es el candidato elegido. Si no, se siguen eliminando enfrentamientos hasta que uno de los candidatos no es derrotado en ninguno de los enfrentamientos que quedan. Veamos cómo se aplica este método de eliminación a nuestro ejemplo. Los tres enfrentamientos entre nuestros candidatos son:

D > I: Diego gana a Inés por una diferencia de 1 voto.

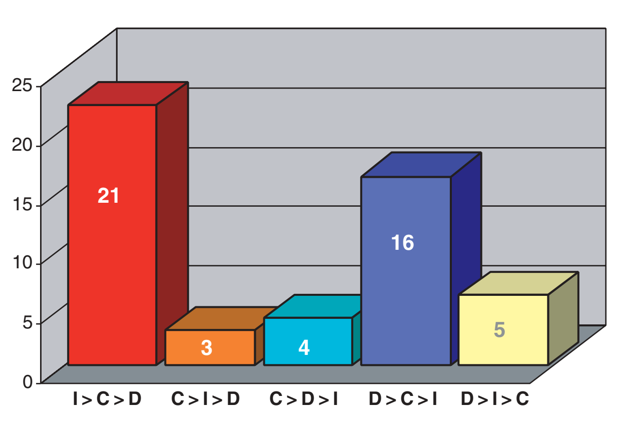
I > C: Inés gana a Carolina por una diferencia de 3 votos.

C > D: Carolina gana a Diego por una diferencia de 7 votos.

Al eliminar el enfrentamiento más reñido, D > I, Inés resulta ser la ganadora Condorcet, porque nunca es derrotada en los dos enfrentamientos que quedan. Es decir, el método de Condorcet da a Inés como ganadora. Sin embargo, en una votación simple entre los tres candidatos, con su correspondiente segunda vuelta de desempate, Diego es el candidato elegido.

Existen otros métodos de votación que *a priori* parecen igual de razonables. El llamado *recuento de Borda* consiste en que cada votante puntúa a los candidatos de acuerdo con su preferencia: con 2 puntos al primero, 1 punto al segundo y 0 puntos al tercero. Si utilizamos este método en nuestra clase, Inés obtiene $21 \times 2 + 3 + 5 = 50$ puntos. La puntuación de Carolina es $21 + 3 \times 2 + 4 \times 2 + 16 = 51$ puntos y la de Diego $4 + 16 \times 2 + 5 \times 2 = 46$ puntos. Por tanto, con el método de votación de Borda la ganadora es Carolina.

Otra posibilidad es la *votación aprobatoria*, en la que cada votante escribe en la papeleta el nombre de todos los candidatos "que no le desagradan", es decir, los candidatos que aprueba y que desearía que fueran elegidos. Se cuenta el número de veces que aparece el nombre de cada candidato (sin importar el orden en que aparece en cada papeleta) y gana el que ha sido aprobado por más votantes. Para encontrar el candidato que elegiría nuestra clase con este método es necesario hacer algunas suposiciones adicionales. Imaginemos que todos los votantes aprueban a los dos primeros candidatos de su orden particular. En ese caso Inés sería aprobada por $21 + 3 + 5 = 29$ votantes, Carolina por $21 + 3 + 4 + 16 = 44$, y Diego por $4 + 16 + 5 = 25$. Carolina, por tanto, sería la ganadora.



Número de votantes de cada orden de preferencia

Si dependiendo del método de votación puede salir elegido cualquiera de los tres candidatos, ¿cuál es entonces el más justo? Las matemáticas no pueden dar una respuesta nítida a esta pregunta. De hecho, lo que las matemáticas han demostrado es que no existe ningún método de votación "perfecto". Este resultado se conoce como teorema de Arrow. Keneth J. Arrow, profesor de Stanford y premio Nobel de Economía, estableció una serie de condiciones muy básicas que cualquier método de votación debería satisfacer, para luego demostrar que dichas condiciones son incompatibles, es decir, que no existe ningún método que las cumpla en su totalidad. Como decía, las condiciones son muy básicas. Una de ellas, por ejemplo, exige que al eliminar un candidato de una votación el resultado no varíe, a no ser que el candidato eliminado sea el ganador. Esta regla tan simple no se cumple en el método de Condorcet. Sin embargo, los otros métodos también violan condiciones igual de razonables.

La elección del método de votación no es, por tanto, sencilla; se debe hacer utilizando argumentos que van más allá de las matemáticas. Por ejemplo, existen organizaciones políticas que defienden la implantación de la votación aprobatoria destacando las ventajas de este método: con él, el llamado voto útil o voto estratégico carece de sentido, puesto que el votante puede aprobar a cuantos candidatos desee. Por otro lado, las campañas electorales serían menos agresivas y los candidatos se preocuparían más de defender sus programas en lugar de atacar los de los contrincantes. De hecho, la votación aprobatoria se usa en varias sociedades científicas para elegir a los miembros de su junta directiva. Existen multitud de páginas en Internet explicando y defendiendo diferentes métodos de votación. Un sitio interesante es *electionmethods.org*, que se decanta por el método de Condorcet.

La teoría matemática de las votaciones es mucho más amplia de lo que hemos comentado aquí. Estudia las votaciones realizadas por fases, así como la importancia en ellas de los votos estratégicos, es decir, aquellos en los que el votante no vota de acuerdo con su orden de preferencia en alguna de las fases con el objetivo de que su candidato preferido salga finalmente elegido. Analiza también la posibilidad de crear coaliciones de votantes en votaciones ponderadas, además de otras situaciones interesantes.

Como hemos visto, el problema de extraer una decisión colectiva a partir de las preferencias de los individuos que forman un grupo no es tan simple como puede parecer en un principio. Admite distintas soluciones que dan lugar a diferentes resultados; no es fácil decidir cuál de ellas es la más justa o la que mejor representa la opinión del grupo. En adelante, cuando nos digan aquello de que "la democracia es el menos malo de los sistemas políticos", podremos replicar: "De acuerdo, pero, ¿qué democracia?".

Mark Fischetti

Máscaras antigás

La propagación del carbunco en EE.UU. ha incitado a mucha gente a comprar máscaras antigás. Pero no hay que hacerse falsas ideas sobre su eficacia.

El cartucho filtrante de la máscara está diseñado para detener partículas como las del carbunco, sustancias químicas como el gas nervioso y gérmenes como la viruela. Las máscaras se presentan en forma de caretas que cubren boca, nariz y oídos y como verdugos.

En EE.UU. las certifican el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (NIOSH) y los servicios armados. Los dos parámetros clave son el tamaño de la menor partícula que el filtro atrapa (0,3 micras en el mejor caso) y el rendimiento del filtro al eliminar gases, del 95, 99 o 99,97 por ciento.

Pero igualmente cruciales son la adaptación facial y el adiestramiento. Los consumidores deben proveerse en distribuidores que les ajusten el aparato de modo que no haya fugas en la juntura. Debe también instruírseles en colocarse la máscara rápida y ajustadamente; requiere práctica. Además, las personas con problemas respiratorios pueden hallar dificultades al usar una máscara, porque los pulmones han de esforzarse el triple que con la respiración normal. Las máscaras no se ciñen sobre barbas, patillas y cicatrices. Y puede que los filtros deban reemplazarse tras varias horas o días de uso continuo.

Los pedidos de MSA, una empresa de Pittsburgh que fabrica máscaras para clientes especiales (fuerzas armadas, policías y bomberos) o para usos industriales (minería y pintura de coches), habían aumentado mucho, según su director de productos Ken Bobetich, a las tres semanas de que empezara a sentirse pánico al carbunco en Estados Unidos. Hubo quien intentó introducir productos deficientes. Sólo cinco fabricantes hacen máscaras de tipo militar certificadas por el NIOSH, pero hay montones de firmas que deambulan por la Red ofreciendo caretas por 30 euros. Bobetich advierte que no se compren productos sin certificar ni caducados. Señala que, como los filtros son químicamente activos, "por lo normal, no pueden estar almacenadas más de tres o cuatro años". Sólo el filtro cuesta 32 euros. Las máscaras que se anuncien como excedentes militares serán demasiado viejas.

1. LA MASCARA tiene una capa interna, de caucho de silicona, que se ciñe bien a la piel, y una capa más externa impermeable, de caucho butílico, que repele a organismos y sustancias químicas.

2. EL AIRE INSPIRADO atraviesa el cartucho, asciende hasta la copa nasal y la rodea (para no empañar los cristales) y entra a través de una válvula de contrapaso en la cavidad interior. El aire se espira a través de la copa nasal hacia el exterior por medio de una válvula.

COPA NASAL

4. EL DIAFRAGMA, o "transmisor de voz", situado tras la placa delantera perforada, transmite los sonidos vocales del usuario.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **HISTORIA ACTIVA:** En algunas de las primeras máscaras antigás repartidas entre las tropas durante la I Guerra Mundial se emplearon filtros activados químicamente. Según un manual de guerra del ejército norteamericano, una primitiva "careta de hiposulfito" de 1915 neutralizaba el cloro con tiosulfato sódico. Desde entonces, sucesos esporádicos han resaltado la necesidad de mantener medios de protección actualizados: en la guerra Irán-Irak hubo gas mostaza, en 1979 una fuga de carbunco en una planta soviética de Sverdlovsk, en 1995 la secta Aum Shinrikyo lanzó sarín en el metro de Tokio.

➤ **BUENOS NEGOCIOS:** Los libros en boga sobre equipos de supervivencia comprenden desde el enciclopédico *Jane's NBC Protection Equipment* al polémico *Breathe no Evil*, de Duncan Long y Stephen Quayle. Radius Engineering vende, por 4500 dólares, una "célula vital", un sistema de filtrado de un metro veinte de diámetro para una sala de estar hermetizada alimentado por 225 kg de baterías. Polaris International ofrece un "bio-refugio" de 1950 dólares, una burbuja de plástico con un sistema filtrador de aire para el hogar, en la que puede meterse la familia cuando empiece el ataque con gérmenes.

➤ **LOS NIÑOS, SIN SALVACION:** Por lo general, los fabricantes no hacen máscaras antigás infantiles, y los legisladores no las aprobarían. Aquéllos y éstos mantienen que respirar a través de una máscara es demasiado fatigoso para los niños y que sus estructuras faciales varían tanto, que ninguna máscara estándar cerraría herméticamente.



3. EL FILTRO DE PARTICULAS encierra fibras naturales, de vidrio o sintéticas capaces de retener partículas de sólo 0,3 micras, entre ellas de carbunco, tuberculosis y amianto.

Un filtro activo (normalmente de carbón vegetal impregnado de óxido de cobre con sales de plata o zinc) detiene los vapores (gas sarín, amoniaco). El carbón absorbe físicamente algunos contaminantes. Otros son adsorbidos superficialmente por fuerzas moleculares o de van der Waals, cuando no neutralizados por reacción química con las impregnantes.

El polvo de carbón es atrapado por un filtro de polvo, el más interno.

LIBROS

Siglo XVIII

Segunda mitad

INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE LOS INFINITOS, por Leonhard Euler. SAEM "Thales"- Real Sociedad Matemática Española; Utrera, 2000.

ALBRECHT VON HALLER. COMMENTARIUS DE FORMATIONE CORDIS IN OVO INCUBATO. Edición crítica de Maria Teresa Monti. Schwabe & Co AG Verlag; Basilea, 2000.

ENCYCLOPAEDIC VISIONS. SCIENTIFIC DICTIONARIES AND ENLIGHTENMENT CULTURE, por Richard Yeo. Cambridge University Press; Cambridge, 2001. **THE SCOTTISH ENLIGHTENMENT: ESSAYS IN REINTERPRETATION.** Dirigido por Paul Wood. University of Rochester Press; Rochester, 2000.

ALESSANDRO VOLTA. ELETTRICITÀ. SCRITTI SCELTI. Edición preparada por Giuliano Pancaldi. Giunti; Florencia, 1999. **THE MATTER OF MOTION AND GALVANI'S FROGS,** por B. Innes Williams. Rana; Bletchingdon, 2000.

GENETIC PREHISTORY IN SELECTIVE BREEDING. A PRELUDE TO MENDEL, por Roger J. Wood y Vitezslav Orel. Oxford University Press; Oxford, 2001.

MANUSCRITS ET PUBLICATIONS DE HORACE-BÉNÉDICT DE SAUSSURE SUR L'ORIGINE DU BASALTE (1772-1797). Edición preparada por Albert V. Carozzi. Editions Zoe; Carouge/Ginebra, 2000.

Suiza amamantó tres figuras egregias de la ciencia del siglo XVIII, cuyo influjo iba a trascender el tiempo y el espacio: Leonhard Euler, Albrecht von Haller y Horace-Bénédict de Saussure. Iluminó el primero la matemática, con el segundo se sistematizó la fisiología y puso el tercero los cimientos de la teoría geológica. Poseyeron en grado notable la cualidad más preciada en su disciplina respectiva. Así, finura analítica en Euler, habilidad experimental en Haller y agudeza de observación en de Saussure.

Euler (1707-83) se formó en la Universidad de Basilea, donde se graduó con una tesis sobre la filosofía de Descartes comparada con la de Newton. Frecuentó a la familia Bernoulli. A instancias de Daniel, uno de sus vástagos, se traslada en 1727 a San Petersburgo para incorporarse a la Academia de Ciencias. La muerte de la zarina le obligó a buscarse trabajo en el Colegio Naval. Sustituye luego a Bernoulli en la clase de matemática de la Academia. Acepta en 1741 la invitación de Federico el Grande para integrarse en la de Berlín. Tras una larguísima estancia volverá en 1766 a San Petersburgo, al que se había mantenido vinculado a través de una constante colaboración en su revista.

En su prolífica obra sistematizó el análisis, modernizó el cálculo y la trigonometría, resaltó la importancia de *e* (número de Euler 2,71828…), desarrolló las soluciones por series, con especial atención a la convergencia, y resolvió ecuaciones diferenciales lineales. Múltiples teoremas llevan su nombre, como la famosa regla que establece que, dado un poliedro de v vértices, c caras y a aristas, se cumple la igualdad $v + c - a = 2$.

La *Introducción al análisis de los infinitos* viene acompañada por documentadas introducciones que sitúan en su tiempo la figura de Euler, presentan la evolución del autor y se detienen en el mundo de los infinitos, entendidos como una herramienta para el estudio de las funciones, pues en ese libro no hallará el lector ni derivadas ni integrales. Aparecida en 1748, no era la obra un escrito primerizo, aun cuando la tuviera redactada cuatro años antes. (La edición española presenta sólo el primer volumen de los dos que componen la obra latina.) En 1736 había editado una imponente *Mechanica sive motus scientia analytice exposita*, donde la mecánica recibe un tratamiento analítico, es decir, por coordenadas. Hasta entonces la exposición seguía el modelo geométrico newtoniano. De ese mismo año son las grandes líneas de la teoría de grafos trazadas a propósito de su célebre artículo sobre los puentes de Königsberg. Ya en Berlín dio a la imprenta su primer cálculo de variaciones o *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti*, renovado en una vía más analítica más tarde, a sugerencia de Lagrange.

Con la *Introducción*, culmina la triada matemática básica: geometría, álgebra y análisis. Los infinitos del título remiten a ambos extremos de la magnitud, los grandes y los pequeños. Define la noción de función. Distingue entre funciones algebraicas y funciones trascendentes; divide a las primeras en racionales e irracionales, y a las racionales en polinomios y fraccionarias. Aborda la descomposición en factores de polinomios. Obtiene la fórmula del binomio de Newton.

Un año más joven que Euler, von Haller (*De formatione cordis in ovo incubato*) nació en Berna. Si los sumarios históricos se limitan a subrayar su descubrimiento de la tendencia del músculo a contraerse ante un estímulo nervioso, es decir, de lo que se dio en llamar la irritabilidad, otros relatos biográficos más amplios detallan ya sus incursiones en distintos campos de la fisiología, con ocasionales alusiones a sus habilidades experimentales. Maria Teresa Monti ha ido mucho más allá en su investigación modélica sobre esta monografía embriológica, coronación de los trabajos de Haller en ese campo.

Coronación fallida, empero. Pese a ello revela el sentido autocrítico y la revisión constante del quehacer inquisitivo de Haller. Su estudio *En torno a la formación del*

corazón en un huevo incubado emergió fundada en un total de 458 protocolos de observaciones. Tras una redacción preliminar en latín, se tradujo para imprimirla en francés, aunque a la postre se reelaboró en la lengua de Cicerón, que es como salió de tiros en 1767. Monti ha contrastado apuntes manuscritos, esquemas y borradores para extraer el pensamiento, no siempre seguro, de su autor. Un científico, éste, en plena madurez y en el ápice de su fama, capaz de poner en tela de juicio sus ideas epigenéticas sobre la generación para adoptar, por la fuerza de una experimentación replanteada, las tesis preformacionistas.

Téngase presente que Haller representa, como muy pocos, el espíritu enciclopédico del siglo XVIII. Familiarizado con los clásicos, creador de una sistemática propia de la flora suiza y, por encima de todo, fundador de la fisiología experimental en un tiempo en que no se disponía todavía de la teoría celular. La correspondencia que mantuvo con Charles Bonnet nos revela su afán por disponer los medios ópticos más idóneos para la observación del progreso del corazón en el embrión de pollo.

El descubrimiento del desarrollo de la estructura del corazón constituyó una piedra miliar en el establecimiento de la ciencia anatómica como base de la fisiología. Haller se había ocupado de la generación en clave epigenética en sus *Primae lineae physiologiae*, de 1747. Diez años más tarde se inclinaba ya por el preformacionismo al estudiar la evolución de los huesos de pollo. Las investigaciones sobre los huevos incubados habían comenzado en 1755. Haller describió con claridad el atrio primitivo indiviso, interpretando así correctamente la *auricula* de Marcello Malpighi. Identificó, como primera señal de separación en su interior, el septo interatrial, del que indicó los cambios de forma y posición. Observó la constricción (*fretum Halleri*) que existe entre el único ventrículo originario y el *bulbus*. Vio el esbozo del segundo ventrículo.

Pertenecen a una generación posterior Denis Diderot (1713-84) y Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783), quienes comenzaron a publicar la *Encyclopédie* en 1751, terminada en 1772 con 17 volúmenes de texto y otros 11 de láminas (*Encyclopaedic Visions. Scientific Dictionaries and Enlightenment Culture*). La necesidad de compendiar el saber exigido a una persona culta se había querido ya satisfacer con diccionarios de artes y ciencias, harto más concisos, de la primera mitad del siglo XVIII. A éstos los habían precedido, a su vez, vocabularios especializados, como el *Dictionnaire Mathématique* de Jacques Ozanam.



Albrecht von Haller (1708-1777)

El círculo del aprendizaje o círculo del conocer —que a eso responde la noción clásica de enciclopedia— tiene una historia larga, no exenta de momentos de crisis y cambio. Pero la enciclopedia evidencia también una connotación inmediata con la modernidad, con la voluntad de generalizar la información y exponerla al libre intercambio. La *Encyclopédie* se había concebido como una traducción de la *Cyclopaedia* de Ephraim Chambers, un diccionario inglés de artes y ciencias aparecido en 1728 tras el éxito alcanzado por el *Lexicon Technicum* de John Harris. El frontispicio de la *Cyclopaedi*a traslada "La Escuela de Atenas", el famoso fresco de Rafael, de la academia a la plaza, a un espacio abierto y público donde habitan los individuos y los grupos interesados en la observación y la experimentación. Se trata de la realización del programa baconiano para el fomento del conocimiento natural y de las artes y oficios.

El viejo sueño medieval de ir recuperando, y archivando, el conocimiento de la naturaleza perdido a raíz de la caída persistió hasta la *Encyclopaedia* de Johann Heinrich Alsted, en pleno siglo XVII. El mismo Diderot recogía en el tomo V de la suya la idea de encapsulamiento del saber, una suerte de abrigo donde la humanidad hallara refugio en el caso de una catástrofe. A las escuetas siete artes liberales de antaño, las nuevas incorporaban una poderosa novedad, los grabados. Amén, por supuesto, de la mecánica y astronomía recién elaboradas por Isaac Newton, Huygens, Wallis, etcétera.

Con la adopción de la ordenación alfabética se facilitaba la puesta al día de nuevos datos sin menoscabo del enlazado sistemático en el seno de una misma ciencia o



Frontispicio de la Cyclopaedia *de Ephraim Chambers, 1727*

entre ciencias distintas, semillas de lo que, muy pronto, serán tratados específicos. Sigue esa pauta la *Encyclopaedia Britannica*, aparecida en Edimburgo en 1768, sobre la que se volcaron filósofos y científicos de la Ilustración escocesa (*The Scottish Enlightenment: Essays in Reinterpretation*).

La expresión "ilustración escocesa" se acuñó en el siglo XIX para indicar la difusión de las ideas filosóficas de Francis Hutcheson, George Campbell y Thomas Reid. Tuvo, sin embargo, un componente científico básico, que para algunos constituye el carácter distintivo. En cualquier caso, seis rasgos la definen. En primer lugar, su asiento urbano: en Aberdeen, Glasgow y, sobre todo, Edimburgo; la representaron profesionales (clérigos, abogados médicos) y académicos; contó con la participación de la sociedad, expresada en organizaciones y cenáculos; defendía que todas las formas del conocimiento constituían parte de un todo integral; el conocimiento, además de un bien deseable, servía de fuerza impulsora del progreso del individuo y de la comunidad; por último la Ilustración escocesa se halla inextricablemente unida a formas de cultura material, en particular la actividad editora. Ninguno de esos caracteres era exclusivo de Escocia, pero unidos allí formaron un nexo social e intelectual singular.

Es evidente que sin la estatura intelectual de los matemáticos y físicos Matthew Stewart, Charles Alston, Robert Simson, James Ferguson y Colin McLaurin, sin la de los médicos Francis Home, Robert Whytt, William Hunter, William Cullen y John Brown, y sin el botánico George Fordyce, el país no se hubiera convertido en el foco de irradiación que fue. Conviene no olvidar que Euler se basó en McLaurin para reformar su mecánica en 1765 con la *Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum ex primis nostrae cognitiones principiis stabilita*, donde estudiaba el movimiento del sólido rígido y sus ecuaciones diferenciales, refiriéndolo ya a ejes fijos.

En la electricidad se compendia la orientación aplicada de la ciencia en el Siglo de las Luces (*Alessandro Volta. Elettricità. Scritti scelti* y *The Matter of Motion and Galvani's Frogs*). Para Italia representa, además, uno de los momentos álgidos de su tradición científica después de Galileo. Nacido en Como en el seno de una familia de la pequeña nobleza, Alessandro Volta (1745-1827) complementó su formación humanística con el estudio de los trabajos de Pieter von Musschenbroek, Stephen Gray, Charles François Dufay, Jean Antoine Nollet, Giambatista Becaria y Benjamín Franklin. Fruto de esas lecturas fue su primer escrito, de 1769, sobre la fuerza del fluido eléctrico. A los "fluidos" apelaban los físicos de entonces para explicar el calor, la electricidad o el magnetismo.

Los fenómenos eléctricos observados comprendían atracciones y repulsiones entre cuerpos electrizados, centelleos y otros efectos generados por máquinas. A mediados del Setecientos, las máquinas eléctricas disponibles se reducían a dos tipos principales: la electrostática que, accionada con una manivela, producía electricidad por frotamiento, y el condensador —la botella de Leyden— que retenía el fluido eléctrico producido por frotamiento y lo descargaba instantáneamente. Volta añadía en 1775 el "electróforo perpetuo" o portador inextinguible de electricidad. Para su construcción aplastó una mezcla fundida de resinas y otras materias aislantes, sostenida por una especie de copa, sobre la cual descansaba un escudo metálico que subía o bajaba mediante un mango. La mezcla aplastada se cargaba con la máquina electrostática. El secreto de la electricidad inagotable del electróforo estaba, diríamos hoy, en la inducción electrostática, es decir, en la acción de los campos que se producían levantando y bajando el escudo sobre el aplastamiento.

Cuando los cuerpos electrizados se hallaban a determinada distancia entre sí, advirtió Volta, se generaban ciertos fenómenos eléctricos. Investigó esas "atmósferas eléctricas", en realidad fenómenos de inducción electrostática, y desarrolló los conceptos de "capacidad" y "tensión". Sobre todo, hizo amplio uso de lo que denominaba "actuación" eléctrica, la modificación de la tensión provocada por la cercanía entre dos cuerpos cargados. Ideó un condensador para acumular, multiplicar y hacer manifiesta la electricidad débil, en cuyo marco hemos de situar la polémica con Luigi Galvani a propósito de la electricidad animal.

El uso de la electricidad con fines terapéuticos fue un sueño acariciado por los médicos del siglo XVIII, mucho antes de que, en 1791, Galvani publicara su *De viribus electricitatis in motu musculari*. Pero la constante frustración de todos los intentos llevó a varios al escepticismo sobre la electricidad animal, Volta entre ellos. Había excepciones, por supuesto. Volta no dudaba de que las sacudidas

producidas por algunos peces fueran de naturaleza eléctrica. De su idea por construir un torpedo "artificial" nació la pila. En su forma columnar original, la pila estaba constituida por numerosos pares metálicos —un disco de plata y otro de zinc— alternados por discos de cartón humedecido en agua salada. Aumentando el número de pares metálicos se reforzaba el poder de la máquina.

Galvani (1737-1798) se había formado en la facultad de medicina de la Universidad de Bolonia. En 1762 defendió su tesis *De ossibus*, sobre la composición química, estructura, formación, nutrición y enfermedades de los huesos. A esa primera disertación anatómica siguieron otras. Cuando se ocupó del tracto renal de las aves, creó el método de inyección para mostrar la anatomía del sistema urinario. Hasta entonces se empleaba la técnica de la maceración, pero él, conocedor de que la orina de las aves se coagula en una suerte de pasta blanca si se retiene su flujo, ligó los uréteres permitiendo que la orina se confinara en el sistema renal para distenderlo y endurecerlo en un molde blanco, réplica de las partes componentes. Así evidenció las interioridades de la estructura renal. Prosiguió con la inyección de venas y arterias, trazando su curso en los lóbulos renales poniendo de manifiesto las diferencias entre aves y cuadrúpedos.

En 1775 se entrega de pleno al estudio experimental del movimiento. Buscaba el "material" de las contracciones musculares. Por trabajos previos en torno a la irritabilidad halleriana, sabía de la capacidad del opio para anularla, si se aplicaba la droga a grandes dosis o de forma continuada. Observó que los nervios y los músculos producían una elevada cantidad de "gas inflamable", mayor que cualquier otra parte sólida. Y presta atención a un descubrimiento reciente de Volta: los "aires inflamables" (hidrógeno, metano), en presencia de "aire deflogistizado" (oxigeno), explotan si los cruza una chispa emitida por una máquina eléctrica.

Galvani adaptó ese modelo de la reacción entre electricidad atmosférica y aire inflamable a sus experimentos con ranas, salamandras y víboras. ¿Cuál era el mecanismo fisiológico implicado en la respuesta a la estimulación eléctrica? Sistematizó sus hallazgos en *De viribus*, una monografía dividida en cuatro partes: los efectos de la electricidad artificial sobre el movimiento muscular, los efectos de

Fundamentación de la matemática

THE SEARCH FOR MATHEMATICAL ROOTS, 1870-1940, LOGICS, SET THEORIES AND THE FOUNDATIONS OF MATHEMATICS FROM CANTOR THROUGH RUSSELL TO GÖDEL, por Ivor Grattan-Guinness. Princeton University Press; Princeton y Oxford, 2000.

En el período 1870-1940 tuvo lugar una revolución conceptual que había de influir de forma definitiva en el contexto en que, desde entonces, se desarrollaría la labor matemática y la concepción filosófica que de esta disciplina se tenía. Esta revolución se generó en el seno mismo de la matemática a partir de la complejidad que adquirió en la segunda mitad del siglo XVIII y la primera del siglo XIX.

Influyeron, en su desarrollo, las geometrías no euclídeas —cuestionando la validez del sistema axiomático euclídeo—, la geometría proyectiva —con su forma particular de entender el infinito—, la aparición de estructuras abstractas cada vez más complejas —con la aportación de un quehacer más formal y menos figural—, y finalmente, la complejidad del análisis matemático —tanto la que, en sí mismos, presentan los números reales, cuanto el concepto de continuidad y, de una forma muy particular, el concepto general de función. Esta revolución, motivo de estudio durante más de cien años, constituye hoy una disciplina filosófico-matemática muy importante: la fundamentación de la matemática.

La obra sigue de cerca las fluctuaciones del pensamiento de sus protagonistas, empezando por las posibles influencias de la vertiente más algebraica (Peirce y Schröder), pasando por el nacimiento y consolidación de la teoría de conjuntos (Cantor), la influencia real que tuvo la obra de Frege en el desarrollo de la fundamentación de la matemática, así como en Bertrand Russell, y la que la obra de Russell y Whitehead tuvieron en el futuro de la matemática. No olvida las dos grandes aportaciones de Hilbert —la lógica o teoría de la demostración y el formalismo o metamatemática— ni tampoco la enorme influencia de Peano.

La densidad de la obra dificulta una síntesis breve suficientemente rigurosa. Pero cabe un adjetivo para valorarla. Es una obra excelente y, entiendo, que constituirá un texto de referencia en adelante. Sus principales virtudes son la enorme capacidad de analizar las relaciones entre las distintas aportaciones, así como también sus desencuentros; una gran habilidad para acercarnos a esta ingente revolución a través de la visión del matemático sin olvidar las repercusiones de índole filosófica, tan notables (Carnap, Whittgenstein, Husserl, Ramsey, G. E. Moore, etc.) y el estudio pormenorizado —y a la vez contextualizado— de las paradojas, su significado y sus consecuencias. El texto no olvida tampoco los inicios de la escuela polaca, con Lukasiewicz, Lesniewski y Tarski. Constituye una espléndida exposición de esta época, que termina con el teorema de incompletitud de Gödel.

Si cabe alguna objeción, diría que su exposición del intuicionismo —debido a su escasa influencia en la matemática ulterior— es muy somera, así como tampoco deja entrever el importantísimo papel que la técnica desarrollada por Gödel en el teorema de incompletitud —como fundamento de la teoría de la recursividad— tendría en el futuro de la matemática. La razón es obvia. Dicha técnica no está íntimamente vinculada con la crisis de fundamentos.

Como suele tenernos acostumbrados Grattan-Guinness, ésta es completísima —más de setenta páginas de notas a doble columna—, con el objetivo de justificar sus afirmaciones, complementar su información, dar posibles explicaciones alternativas a la defendida en el texto, contextualizar históricamente el momento de que se trata, el concepto que se maneja o referenciar el estado cultural de la época.

En el último capítulo —fruto de sus investigaciones y de su trabajo de campo—, nos ofrece una decena de cartas inéditas del entorno de Russell que completan una obra meritoria.

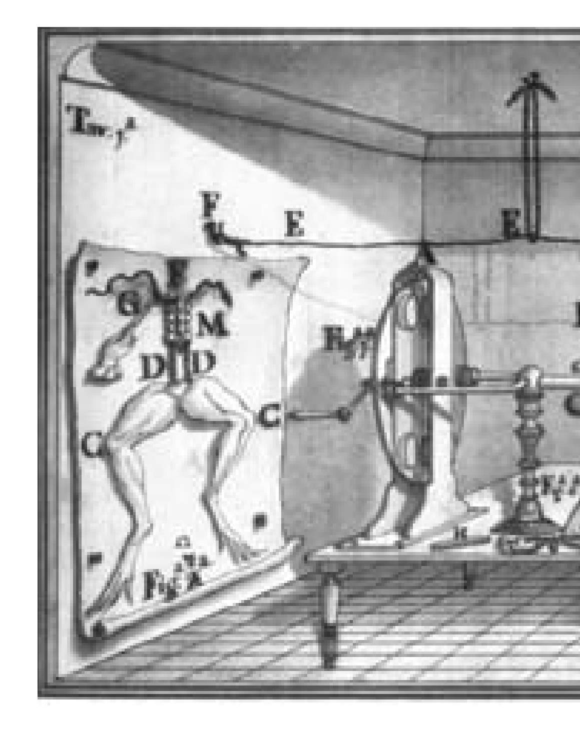
—JOSEP PLA I CARRERA

la electricidad atmosférica sobre el movimiento muscular, los efectos de la electricidad animal sobre el movimiento muscular y los efectos de la electricidad animal sobre el movimiento muscular: conjeturas y conclusiones. Dando por supuesto que los nervios contenían un fluido intrínseco, al que llama "fuerza nerviosa" o "espíritus animales", demuestra que ese fluido en cuestión era idéntico al fluido eléctrico. No es necesaria una chispa eléctrica para estimular los nervios; les basta con una cantidad muy pequeña, electricidad débil, para provocar el impulso de contracción.

Poco a poco se va haciendo la luz en la secuencia real de la teoría de la herencia (*Genetic Prehistory in Selective Breeding. A Prelude to Mendel*), cuyo origen el lugar común adscribe todavía a la fortuna del pasatiempo de un monje ocioso. Nadie mejor para acometer ese trabajo que el biógrafo más autorizado de Mendel, Vitezslav Orel. Para éste, el Siglo de las Luces preparó el marco e inició una tendencia que culmina en el abad de Brno. El sujeto experimental fue la oveja merina.

La domesticación y la mejora por cruzamiento se remontan al Neolítico. Mas, para el estudio de la prehistoria inmediata de la genética, importa la figura de Robert Bakewell (1725-95) de Dishley en Leicerstershire. Su discípulo George Culley acuñó la expresión "doctrina ovina de Bakewell" para referirse a las prácticas del granjero de Dishley en Leicerstershire. ¿En qué consistían éstas?

En su empeño por mejorar el ganado (ovino, bovino, caballar y porcino), diseñó de entrada un buen sistema de riego de la finca familiar. La abundancia de agua favorecía el crecimiento adelantado de los pastos. Procuró que los animales dispusieran de un régimen regular de alimentación, altamente nutritivo. Incluso en verano se oponía a que los animales se agruparan en grandes rebaños, por reputarla una práctica bárbara de la que se resentían los individuos más débiles. Seleccionó y dividió por grupos pequeños a los mejor dotados. Buscaba variedades que satisficieran la creciente demanda pública de carne. Debían, pues, portar determinados rasgos físicos: cuerpos rechonchos, cuartos traseros lisos, cabeza pequeña y paticortos. El éxito de Bakewell reflejaba una actitud pragmática hacia la herencia. Aunque la naturaleza de ésta seguía envuelta en el misterio, el cruzamiento selectivo daba sus frutos palpables.



Laboratorio experimental de Luigi Galvani (1737-1798), con su retrato a la derecha

Así se fueron esbozando una serie de principios que prendieron entre los mejoradores. En primer lugar, importaba la naturaleza intrínseca

Supernovas y modelos de universso

TYPE IA SUPERNOVAE: THEORY AND COSMOLOGY. Dirigido por Jens Niemeyer y Jim Truran. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

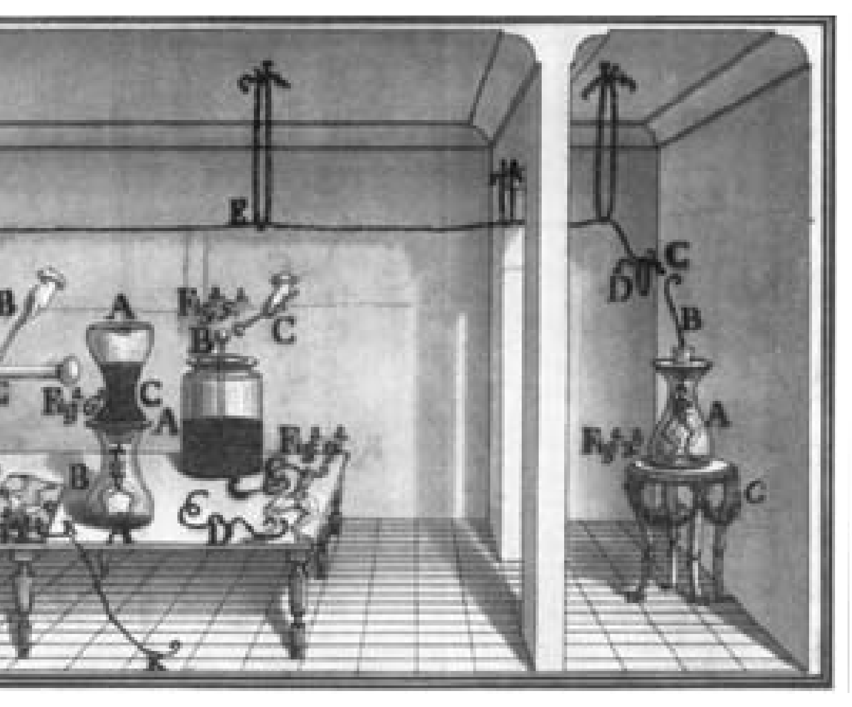
Este libro contiene los trabajos presentados en una reunión, celebrada en 1998 en la Universidad de Chicago, para debatir las pruebas en pro de la aceleración de la expansión del universo aportadas por las observaciones en supernovas de tipo Ia.

La posibilidad de una aceleración en la expansión del universo, anunciada en 1997, tomó por sorpresa a la comunidad astronómica, aunque era esperada por algunos de los modelos cosmológicos inflacionarios. Se trata de saber si el universo es abierto o cerrado, así como cuáles son los procesos físicos implicados en una u otra opción. Si el universo sigue acelerado, nos hallamos en un universo abierto, que seguirá siempre expandiéndose. Las razones para tal comportamiento podrían deberse a la energía gravitacional del universo, menor de lo que pensábamos; o bien a la existencia de procesos que todavía desconocemos.

El carácter estrictamente atractivo de las fuerzas gravitatorias llevó a Einstein a postular su "constante cosmológica", que le permitía evitar el colapso global del universo, sin tener que recurrir a un término repulsivo en la gravitación. Cuando se descubrió más tarde la expansión del universo y se desarrolló la teoría de la "gran explosión", se abandonó la idea de una constante cosmológica.

Se planteó entonces la cuestión de la posible reversión de la expansión en algún momento, haciendo que el universo se cerrara sobre sí mismo, o de la posible expansión indefinida en un universo abierto. Desde principios de los años ochenta, se han desarrollado los modelos inflacionarios, que sugieren que el universo ha tenido épocas de expansión rápida (épocas de inflación). Estos modelos incluyen aspectos novedosos, como una energía del vacío dominante, que se traduce en una constante cosmológica positiva, o campos de partículas con presión negativa que evolucionan en el tiempo (la llamada "quintaesencia"). La existencia de una energía del vacío dominante o de partículas con presión negativa implica la posibilidad de episodios en los cuales el universo se acelere o que haya desaceleración de la expansión y el universo sea abierto.

¿Qué papel desempeñan las supernovas (SN) en este debate? Las SN constituyen uno de los episodios más violentos que ocurren en el universo. Marcan, con una fuerte explosión, el final de la vida de una estrella. La explosión lanza las capas externas de la estrella a velocidades que llegan a alcanzar hasta 20.000 kilómetros por segundo (un poco menos que una décima de la velocidad de la luz); el brillo máximo que se genera





de un animal (su raza o estirpe); se requerían unas prácticas ganaderas idóneas en cuanto a la alimentación y el aprisco; se aconsejaba la introducción controlada de otras razas, pues el cruzamiento selectivo permitía crear nuevas razas; resultaba manifiesto que la endogamia de una estirpe privilegiaba la transmisión de los caracteres; se confirmaba que ambos sexos contribuían por igual a la herencia; podía aplicarse la mejora selectiva a un solo rasgo o a varios a la vez.

En el debate sobre el origen del basalto se espejan los primeros tanteos estructuradores de la geología ilustrada (*Manuscrits et publications de Horace-Bénédict de Saussure sur l'origine du basalte* (1772-1797). ¿Era el basalto de las columnas prismáticas un producto particular de la precipitación en el océano universal, tesis neptunista, o se trataba de una verdadera lava, tesis vulcanista? Para resolver el dilema, de Saussure visitó los volcanes, apagados y vivos, de Europa. Viajó por Italia, Auvergne, el Vivarais y Provenza. Carozzi, suizo de origen él también, ha compilado los manuscritos de campo y publicaciones dispersas, con precisos comentarios científicos e históricos. Además, pone en contraste las ideas del naturalista ilustrado con el pensamiento geomorfológico contemporáneo.

Volvemos a encontrar en de Saussure la misma mentalidad abierta que en Haller y que en el propio Euler cuando deja dormir sus escritos hasta que Lagrange desarrolle su teoría sobre el cálculo de variaciones. En un primer momento, 1768-1776, de Saussure acepta la interpretación de N. Desmarest que asocia el basalto prismático de Auvergne a la lava. Se mueve luego entre la duda atraído por la posibilidad de un doble origen, primero acuoso, sometido éste luego a un proceso de fusión volcánica. Por último, se decide por la tesis neptunista. Carozzi termina incidiendo, una vez más, en su feliz hallazgo: la explicación saussuriana de la formación de los Alpes mediante un mecanismo de compresiones horizontales.

—LUIS ALONSO

es similar al de toda una galaxia. El brillo aumenta muy rápidamente hasta alcanzar este máximo y luego decae en cuestión de meses.

En razón de sus características espectrales, las SN se clasifican en dos clases principales: tipo I y tipo II. Las supernovas de tipo II (SNII) muestran líneas de absorción de hidrogeno, mientras que las del tipo I (SNI) no presentan ninguna línea de hidrogeno. La masa de las estrellas progenitoras de las SNII multiplica por ocho la masa solar (son estrellas ''masivas''). Ahora bien, las progenitoras de las SNI pueden ser de dos tipos y se subclasifican en SNIa y SNIb. Las progenitoras de las SNIb, al igual que las de las SNII, también son estrellas masivas, en tanto que las de las SNIa, mucho menos masivas, son enanas blancas, que explotan al recibir masa de una compañera cercana en un sistema binario cerrado.

Una propiedad muy importante de las SNIa reside en su brillo máximo, que es muy uniforme; se reconoce muy bien la evolución de su luminosidad (la curva de luz). Debido a esto, las SNIa que ocurren en otras galaxias pueden servir de ''bujías'' de referencia para medir las distancias a las galaxias huésped. Los resultados permiten medir la constante de Hubble y el ritmo de desaceleración del universo. A ello debemos los resultados sorprendentes que parecen implicar que el universo se está acelerando.

Obviamente, para estar seguros de que así son las cosas, necesitamos entender cómo varía la evolución de las SNIa en diferentes etapas del universo. También se requiere conocer los efectos del polvo interestelar en las épocas tempranas del universo, que pueden absorber la luz y hacernos creer que las SNIa se hallan más lejanas de lo que en realidad están. Ambas cuestiones, la evolución de las SNIa en función de la edad del universo y los efectos del polvo, son poco conocidos.

—JOSÉ FRANCO

Aventuras problemáticas

Dennis E. Shasha

¿Dónde está la osa polar?

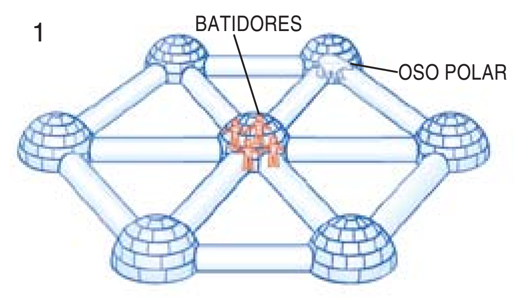
Imaginemos un centro de investigación en el Ártico canadiense. El centro, desocupado en invierno, consta de siete iglúes-laboratorio conectados por pasadizos cubiertos. Cada pasadizo conecta dos iglúes. Durante un invierno particularmente crudo, un oso (u osa) polar se cuela en uno de los iglúes y vagabundea por el complejo vacío. Los científicos deciden enviar un equipo de batidores para que calmen al oso con un dardo tranquilizante, pero no saben cuántos escopeteros han de enviar.

Las normas de seguridad estipulan que para examinar un iglú son necesarias dos personas como mínimo, que han de llegar juntas hasta cada sala, y que han de hacerlo por el mismo pasillo. Ahora bien, una sola persona se basta para impedir que el oso penetre en un iglú ya examinado. En los pasadizos, el oso, que ama los espacios abiertos, siente claustrofobia, por lo que no se esconderá en ellos. Lo que sí hará, en cambio, es pasar a toda velocidad de un iglú a otro, y como se mueve muy rápidamente (mucho más que los batidores) se puede considerar que el tiempo de tránsito viene a ser igual a cero.

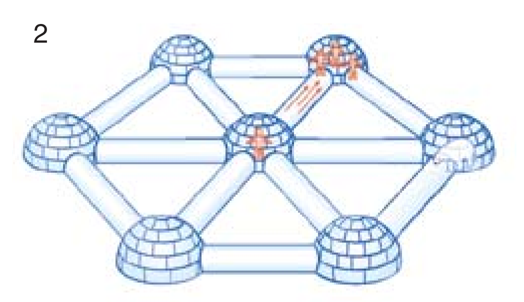
Supongamos que el complejo tiene la forma de una rueda con seis radios, con un iglú en el centro y otros seis equidistantes en el perímetro. En tal caso, cuatro escopeteros son suficientes para localizar al oso (*véanse las figuras 1 a 3, a la derecha*). Pero, ¿y si los científicos hubieran olvidado la disposición exacta de los iglúes del centro de investigación? Todo cuanto saben de seguro es que hay al menos un pasadizo que conecta cada iglú con algún otro y que esos corredores no se cortan ni se cruzan. (En matemáticas, tales configuraciones se llaman grafos planares.) En la figura 4 se ofrece un ejemplo. Los batidores pueden empezar en el iglú que prefieran. ¿Cuál es el mínimo número de escopeteros que hay que enviar?

Imaginemos ahora que sean 100 iglúes dispuestos en una retícula rectangular. Cada iglú tiene pasadizos que los conectan con sus vecinos en horizontal y en vertical (no se permiten corredores en diagonal). ¿Cuál es el número mínimo de escopeteros que puede realizar la tarea?

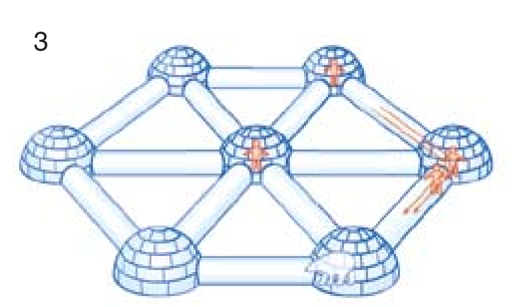
1



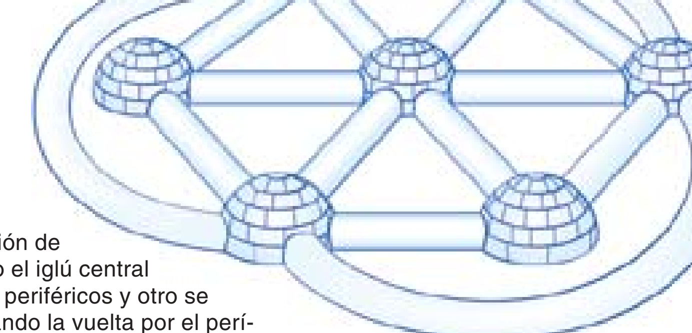
2



3



4



PARA ENCONTRAR a un oso polar en una configuración de rueda y radios, cuatro batidores empiezan examinando el iglú central (*1*). Tres de ellos se desplazan hacia uno de los iglúes periféricos y otro se queda atrás, en el centro (*2*). Los dos restantes van dando la vuelta por el perímetro en la dirección que prefieran (*3*). Ahora bien, ¿cuántos escopeteros serán necesarios para un grafo planar como el mostrado en (*4*)?

Solución del problema del mes pasado:

Al club de la moda pueden pertenecer, como máximo, 12 chicas. Un ejemplo de las ropas que podrían vestir se ofrece en www.investigacionyciencia.es. Ocho es el número mínimo de chicas que puede cumplir la condición de diferencia de modo tal, que la incorporación de una chica más al grupo infringiría la norma. Se da un ejemplo de tal "indumentaria excluyente" en la página de la Red.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.